

# **Návrh metodiky zpracování signálu z optických vláknových senzorů**

Design of signal processing methodology  
from optical fiber sensors

**Ing. Martin Mikolajek**

Disertační práce

Školitel: prof. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.

Ostrava, 2021

## **Abstrakt**

Tato práce se věnuje problematice návrhu vyhodnocovací metodiky zpracování signálu z optických vláken pro účely měření teplot v širokém teplotním rozsahu. Každou měřenou teplotní oblast za pomoci využití optického signálu je nutné vyhodnocovat patřičnou metodou. Měření teplot za pomoci optického signálu užitím jedné metody se většinou využívá pouze v úzkém teplotním měřicím rozsahu. Hlavním cílem této práce je nalezení vhodné kombinace vyhodnocovacích metod pro převod teplot z optických signálů v širokém teplotním rozsahu. Problematika je řešená sjednocením luminiscenčních vyhodnocovacích metod a principů záření černého tělesa. Výsledky této práce popisují a porovnávají problematiku přesnosti nalezeného a navrhovaného řešení převodu informace z optického signálu na měřenou teplotu pro teplotní oblasti širokého rozsahu. Přínosem této práce je nalezení algoritmů pro sjednocení vyhodnocovacích metod převodu teplot z optických teplotně závislých signálů pro široký teplotní rozsah.

## **Klíčová slova**

Optické vlákno, luminiscence, optické měření, záření černého tělesa, měření širokého teplotního rozsahu, analýza optického signálu, kombinace vyhodnocovacích metod

## **Abstract**

This work deals with the design of evaluation methods for signal processing from optical fibers for the purpose of measuring temperature over a wide temperature range. Each measured temperature range using an optical signal must be evaluated by an appropriate method. Temperature measurement which is based on optical signal using one method is usually used only in a narrow temperature measuring range. The main goal of this work is to find a suitable combination of evaluation methods for the conversion of temperatures from optical signals in a wide temperature range. The problem is solved by unifying luminescence evaluation methods and principles of black body radiation. The results of this work describe and compare the problem of accuracy of the found and proposed solution of information conversion from optical signal to measured temperature for temperature ranges of a wide range. The contribution of this work is to find algorithms for unification of evaluation methods of temperature conversion from optical temperature-dependent signals for a wide temperature range.

## **Key words**

Optical fiber, luminescence, optical measurement, black body radiation, wide temperature range measurement, optical signal analysis, combination of evaluation methods

## **Poděkování**

Děkuji školiteli, za odborné vedené této práce. Také děkuji mé rodině za podporu ve studiu. Poděkování patří také projektu MPO TRIO, FV10422. Výzkum a vývoj optických a vláknově optických senzorů teploty pro automobilové aplikace. Projekt přispěl k řešení této disertační práce.

# Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk .....	7
Seznam obrázků .....	8
Seznam tabulek .....	10
1 Úvod .....	11
2 Základní způsoby měření teplot a způsoby měření pomocí optických metod .....	13
2.1 Základní způsoby měření teplot .....	13
2.2 Důvody měření teplot pomocí neelektrických teplotních senzorů .....	14
2.3 Využití měřicích principů záření černého tělesa .....	14
2.4 Luminiscence .....	15
2.5 Měření pomocí Braggovských mřížek .....	17
3 Problematika měření teploty za pomoci vláknových optických snímačů .....	18
3.1 Současný stav poznání v oblasti luminiscence .....	20
3.2 Komerčně dostupná zařízení pro měření teplot pomocí optiky v průmyslových aplikacích .....	23
4 Formulace cílů disertační práce .....	25
5 Sumarizace a zhodnocení možnosti měření teplot pomocí opticky teplotně závislého signálu...	26
6 Vstupní data pro návrh metodiky zpracování dat z optického vysokoteplotního senzoru.....	29
6.1 Zdroj vstupních dat pro návrh metodiky zpracování dat z optické sondy pro měření teplot v širokém teplotním rozsahu.....	29
6.2 Popis měřicího systému pro získávání vstupních dat.....	31
6.3 Parametry vstupního optického signálu .....	33
6.4 Porovnání opakovatelnosti amplitudových a časových parametrů vstupního signálu .....	38
7 Návrh metodiky pro zpracování optických signálů z širokého měřicího teplotního rozsahu .....	47
7.1 Rozbor důležitých měřených parametrů využitelných pro přepočet teploty z optického signálu .....	47
7.2 Definice rovnic pro jednotlivé přepočty vstupního signálu na údaj o měřené teplotě .....	49
7.3 Ověření možností algoritmu pro využití přepočtu teplot ze signálu pomocí principu záření černého tělesa .....	50
7.4 Ověření možností algoritmu pro využití principu luminiscenční časové metody .....	52
7.5 Ověření možností algoritmu pro využití principu amplitudové luminiscenční metody .....	56
7.6 Návrh algoritmu pro sjednocení využití jednotlivých metod .....	59
8 Ověření výsledků navržené metodiky zpracování dat s optických snímačů .....	63
8.1 Porovnání vyhodnocení metodiky na základě měření černého tělesa .....	63
8.2 Porovnání vyhodnocovací metodiky na základě měření časové metody luminiscence .....	65
8.3 Porovnání vyhodnocovací metodiky na základě měření luminiscenční amplitudy .....	65

8.4	Porovnání vyhodnocení metodiky v celém teplotním měřicím rozsahu .....	67
8.5	Možné využití vyvinutých metod ve vybraných průmyslových aplikacích .....	68
9	Diskuze.....	69
10	Závěr .....	71
	Bibliografie.....	73
	Seznam vlastních publikací a výstupů související s tématem práce.....	76
	Seznam vlastních publikací a výstupů nesouvisející s tématem práce.....	78
	Informace o autorovi dle databází .....	80
	Seznam řešených projektů .....	82
	Životopis .....	83

## Seznam použitých symbolů a zkratk

BBR	Black body radiation, záření černého tělesa
CSV	Comma-separated values, souborový formát určený pro výměnu tabulkových dat
FBG	Braggovská mřížka
NTC	Termistor - odpor termistoru s rostoucí teplotou klesá
PTC	Termistor - odpor termistoru s rostoucí teplotou roste
PL	Doba života náboje luminiscence

## Seznam obrázků

Obr. 1 Schématické zapojení pro využití měření teplot pomocí optické metody záření černého tělesa .....	15
Obr. 2 Princip generování fluorescence [2] .....	16
Obr. 3 Křivka doby dosvitu luminiscence [2] .....	17
Obr. 4 Principiální schéma konfigurace systému měřicího systému pro měření pomocí luminiscenční časové metody [2] .....	20
Obr. 5 Experimentální systém snímače teploty fluorescence [2].....	20
Obr. 6 Teplotní závislost doby dosvitu luminiscence [2] .....	21
Obr. 7 Luminiscenční závislost dle závislosti koncentrace chromu v krystalu [23] .....	22
Obr. 8 Schéma realizovaného testovaného zapojení v článku [23] .....	23
Obr. 9 Měřicí zařízení SITRANS TO500 [22] .....	24
Obr. 10 Konstrukce použité sondy jako zdroj vstupních teplotně závislých dat .....	30
Obr. 11 Popis tvaru signálu luminiscenčního měření.....	34
Obr. 12 Průběhy teplotních závislostí amplitud 30 °C až 850 °C .....	35
Obr. 13 Průběh závislosti amplitudy pro teplotu -30 °C až 140 °C .....	36
Obr. 14 Časová teplotní závislost dosvitu luminiscence při různém poklesu napětí .....	36
Obr. 15 Porovnání maximálních amplitud z dostupných měření pro sondu 1.....	38
Obr. 16 Porovnání rozdílů maximálních amplitud z dostupných měření pro sondu 1.....	39
Obr. 17 Porovnání maximálních amplitud z dostupných měření pro sondu 2.....	39
Obr. 18 Porovnání rozdílů maximálních amplitud z dostupných měření pro sondu 2.....	40
Obr. 19 Porovnání maximálních amplitud z dostupných měření pro sondu 3.....	40
Obr. 20 Porovnání rozdílů maximálních amplitud z dostupných měření pro sondu 3.....	41
Obr. 21 Porovnání maximálních amplitud optického signálu mezi jednotlivými sondami .....	41
Obr. 22 Porovnání rozdílů amplitud mezi sondami .....	42
Obr. 23 Porovnání doby poklesu amplitudy luminiscence o 0,4V pro jednotlivé sondy.....	43
Obr. 24 Porovnání doby poklesu amplitudy luminiscence o 0,4V mezi jednotlivými měřicími sondami .....	44
Obr. 25 Porovnání doby poklesu amplitudy luminiscence o 0,1V pro jednotlivé sondy.....	44
Obr. 26 Porovnání doby poklesu amplitudy luminiscence o 0,1V mezi jednotlivými měřicími sondami .....	45
Obr. 27 Porovnání teplotní závislosti luminiscenčních amplitud sond 1, 2, 3 pro nízké a záporné teploty .....	46
Obr. 28 Porovnání rozdílů amplitud mezi sondami .....	46
Obr. 29 Grafické znázornění optického signálu a jeho vstupních parametrů pro přepočtení teploty pomocí vyhodnocovacího algoritmu .....	48
Obr. 30 Průběh teplotní amplitudové závislosti metody záření černého tělesa .....	50
Obr. 31 Výpočet teplot na základě amplitudy dle principu záření černého tělesa podle definované rovnice a jednotlivých koeficientů.....	51
Obr. 32 Porovnání výsledků rovnic pro výpočet pomocí metody záření černého tělesa.....	52
Obr. 33 Časová teplotní závislost doby poklesu luminiscenčního signálu o úroveň 0,4 V .....	53
Obr. 34 Přepočet času na měřenou teplotu pro měřený teplotní rozsah 200 °C až 350 °C podle koeficientu 1 .....	54
Obr. 35 Přepočet času na měřenou teplotu pro měřený teplotní rozsah 70 °C až 200 °C podle koeficientu 2 .....	54
Obr. 36 Přepočet času na měřenou teplotu pro měřený teplotní rozsah 30 °C až 70 °C podle koeficientu 3 .....	55
Obr. 37 Porovnání rozdílů mezi vypočtenou teplotou a referenční teplotou v celém teplotním rozsahu pokrytém časovým luminiscenčním principem měření .....	55



Obr. 38 Průběh teplotní závislosti vstupního parametru $x_p$ pro výpočet teploty v rozsahu teploty -30 až 140 °C.....	57
Obr. 39 Průběh výpočtu teplotní závislosti na základě luminiscenční amplitudy pro teploty -30°C až 55°C.....	58
Obr. 40 Porovnání rozdílu mezi vypočtenou teplotou a referenční teplotu pro amplitudovou luminiscenční metodu pro teploty -30°C až 55°C .....	58
Obr. 41 Návrh vyhodnocovacího algoritmu pro měření v širokém teplotním rozsahu .....	62
Obr. 42 Bland - Altmanův diagram pro porovnání vyhodnocení teplotních dat vypočítaných pomocí rovnic z opakovaných dvou měření na základě užití vyhodnocovací metody záření černého tělesa...	63
Obr. 43 Bland - Altmanův diagram porovnávající vyhodnocení teplot po přepočtu z optické sondy 1 ve srovnání s referenční teplotou.....	64
Obr. 44 Bland - Altmanův diagram porovnávající vyhodnocení teplot po přepočtu z optické sondy 2 ve srovnání s referenční teplotou. ....	64
Obr. 45 Bland - Altmanův diagram pro porovnání vyhodnocení dat na základě užití časové luminiscenční vyhodnocovací metody .....	65
Obr. 46 Bland - Altmanův diagram pro porovnání vyhodnocení dat na základě užití amplitudové luminiscenční vyhodnocovací metody porovnání sondy 1 a sondy 2 .....	66
Obr. 47 Bland - Altmanův diagram pro porovnání vyhodnocení teplotních dat na základě užití amplitudové luminiscenční vyhodnocovací metody porovnání sondy 1 a sondy 3.....	66
Obr. 48 Bland - Altmanův diagram pro porovnání vyhodnocení teplotních dat z teplotního rozsahu -30 až 850 °C.....	67

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Popis parametrů časového luminiscenčního signálu .....	37
Tabulka 2 Uvedený vzor tabulky pro koeficienty rovnic .....	49
Tabulka 3 Koeficienty testované pro možnost výpočtu pomocí metody záření černého tělesa .....	51
Tabulka 4 Koeficienty pro rovnici přepočtu využívající princip časové luminiscenční metody .....	53
Tabulka 5 Koeficienty pro rovnici přepočtu využívající princip amplitudové metody .....	57
Tabulka 6 Využití zvolených metod a jejich možné přesnosti v jednotlivých teplotních rozsazích na základě měření .....	67

# 1 Úvod

V současné době senzorová technika pro účely měření teplot využívá různé měřicí způsoby. Lze se setkat s obecně známými kontaktními způsoby měření, které pracují na principech změn termoelektrického napětí nebo elektrického odporu. Také je možné se setkat s bezkontaktními měřicími metodami, které využívají emitované záření pozorovaného tělesa. Při využití těchto způsobů měření je nutná potřebná znalost emisivity povrchu pozorovaných měřených těles. Při měření teplot se v aplikacích většinou využívá termočlánekových, nebo odporových snímačů, které jsou styčně spojeny s měřeným předmětem, popřípadě jsou umístěny do prostoru, ve kterém měří danou teplotu okolního plynu. Při návrhu každého měřicího řetězce je potřeba také zohlednit nepříznivé vlivy elektrických a magnetických rušení působících na metalická vedení, které mohou nepříznivě působit na elektrické komponenty, které jsou využívány při měření za pomoci kontaktních metod termočlánekových či odporových snímačů teploty. Vlivy těchto rušení mohou vnést do měřicího řetězce chyby především v částech vedení mezi vlastním teplotním čidlem a vyhodnocovací jednotkou, které převádí signál s čidla na měřicí zesilovač nebo analogově digitální převodník. V aplikacích, ve kterých se mohou vyskytovat tyto vlivy elektrických rušení, je vhodné uvažovat o alternativních způsobech měření teplot.

Z tohoto důvodu se zde nabízí možnosti optických metod využívajících principů záření černého tělesa, luminiscence v krystalech, či optického jevu pracujícím na principu změny indexu lomu v Braggovských mřížkách. Optické metody však pracují se silně nelineárními principy, které je nutné při převodu signálu na požadovanou měřenou veličinu vhodně linearizovat a kompenzovat.

Je známo, že pro různé úrovně měřených teplot je vhodná odlišná měřicí metoda. To platí i pro teplotní měření za pomoci využití optických principů. Pro měření teplot odpovídající vyšším teplotním rozsahům mohou být vhodné optické měřicí metody, které jsou založeny na principech záření černého tělesa. Naopak metody luminiscence krystalu lze využít pro nižší měřené teploty. Luminiscenční metody využívají optické vlákno, jehož jedna koncová část je spojena s luminiscenčním materiálem. Tato část s luminiscenčním krystalem je umístěna v místě měření teploty. Druhý konec vlákna je připevněn k fotodetektoru. Při měření je intenzita či spektrum fotodetektorem přijatého optického signálu informací o měřené teplotě v požadovaném místě měření teploty.

Téma této práce se věnuje problematice rozboru a návrhu metod zpracování signálů pro teploměry určené pro měření v širokém teplotním rozsahu. Pro toto řešení jsou v práci využívány principy luminiscenčního měření a záření černého tělesa. Cílem problematiky této práce je stanovení kombinací měřicích vyhodnocovacích metodik tak, aby bylo možné z měřicího řetězce na základě detekovaného přijatého optického signálu převést měřené vstupní optické informace na hodnoty teplot v jednotkách °C. První částí této práce uvádí základní fyzikálními rozboru optických metod za účelem měření teplot, avšak dále se téma věnuje se pouze možnostem zpracování a vyhodnocení naměřených vstupních dat z optického teplotního senzoru za pomoci způsobů kombinací luminiscenčních metod a záření černého tělesa. Cílem této práce je specifikovat a ověřit algoritmus umožňující měření teplot v širokém teplotním rozsahu pomocí kombinace vyhodnocovacích metod.

Tyto metodiky jednotlivých vyhodnocovacích způsobů měření teplot se musí prolínat v teplotních oblastech, ve kterých jednotlivé metody spolehlivě poskytují definované garantované přesnosti měření. Měřicí řetězec pro měření teplot je založený na optickém principu a pracuje s opticky teplotně nelineárně závislými principy. Při návrhu měřicích metodik a převodu světelného signálu na údaj o měřené teplotě je důležité tyto nelineární jevy zohlednit. Tyto nedostatky se vyskytují například z důvodů zvolené optické metodiky, či z důvodů vlastností fotodetektorů.

Úvodní části textu této práce pojednávají o obecné problematice měření teplot, dále se zabývají problematikou využití měření za pomoci luminiscence a metod měření pomocí záření černého tělesa. Hlavní část práce pak uvádí možné způsoby řešení týkajících se návrhu metodiky měření a převodu informace z optického signálu z vláknových optických teploměrů na údaj o měřené teplotě pro široký teplotní rozsah pomocí využití kombinace jednotlivých vyhodnocovacích metod. Závěrečné části práce se věnují vyhodnocení a možné přesnosti a použitelnosti navrženého řešení pro technickou technickou praxi.

## 2 Základní způsoby měření teplot a způsoby měření pomocí optických metod

### 2.1 Základní způsoby měření teplot

Nejčastěji je v technických aplikacích realizováno měření neelektrických veličin za pomoci použití známých běžně dostupných měřicích metod. Existují však také alternativní způsoby měření, ve kterých je využito neobvyklých principů využití měřicích sensorů. Například publikace [MM1] se zabývá rozpoznáním ražených alfanumerických znaků v průmyslovém prostředí pomocí využití laserového skeneru. Nahrazuje metodu běžného rozpoznání pomocí kamery, která v případě těžkého průmyslu může být těžko aplikovatelná z důvodu znečištění snímaného povrchu. V případě měření teplot je také možné uvažovat o jiném typu měření teplot mimo obvyklou základní skupinu, kterou tvoří odporové teploměry a termočlánky. V těchto principech měření se využívá přímého přenosu tepla mezi měřeným objektem a teplotním senzorem. Ve standardních aplikacích lze měření teplot rozdělit na dva po sobě jdoucí převody. První částí je převod stavu o měřené teplotě na elektrický signál, druhým krokem je převod elektrického signálu na údaj o teplotě. Údaj o měřené teplotě může v některých případech převodu reprezentovat přímo výchylku ručičky na stupnici daného teploměru. Ve většině případů je však potřeba naměřený napěťový signál dále digitálně zpracovávat tak, aby byla tato informace dostupná pro další účely automatizačního řetězce [1].

Do základní skupiny lze zařadit odporové kovové senzory, které se vyznačují vysokým rozsahem měřitelných teplot, dobrou linearitou a časovou stálostí, mezi nevýhody těchto snímačů však může patřit vyšší teplotní setrvačnost a malý teplotní součinitel. Mezi kovové senzory patří například platinové, niklové, či měděné slitiny. Teplotní rozsahy těchto teploměrů mohou být od 200 °C až 1000 °C. Dále existují polovodičové senzory, jejichž hlavní výhodou je velká citlivost, ale disponují vyšším šumem a menším teplotním rozsahem. Tuto skupinu můžeme rozdělit do dvou podskupin negistor NTC a pozistor PTC. Teplotní rozsahy těchto snímačů se pohybují od -50 °C do 180 °C. Další skupinou využívající kontaktní měřicí metody jsou termočlánky. Princip funkce těchto sensorů je založen na Seebeckově jevu. Senzor je vyroben ze dvou kovů a při jeho zahřívání vzniká na jeho koncích termoelektrické napětí. Tyto snímače jsou významné svými malými rozměry. Typický měřicí rozsah se pohybuje přibližně od -190 °C až 1 500 °C. Za nevýhodu termočlánků lze považovat menší citlivost oproti měření za pomoci rezistorů a složitější připojení pomocí předepsaného vedení k vyhodnocovací jednotce [1].

Existují však také bezkontaktní metody, které využívají principu infračerveného záření zahřátého objektu, tato metoda úzce souvisí s metodou, která je předmětem jedné části v řešení popisované problematiky, princip záření černého tělesa. Pomocí tohoto principu je možné provádět bezkontaktně měření pouze povrchové teploty tělesa. Metodu je vhodné aplikovat pouze v opticky čistém viditelném prostředí. Tento úvod do kapitoly zmiňuje existující rozšířené ověřené způsoby měření teplot, avšak kvůli níže uvedené problematice je vhodné se také zbývat metodikami měření teplot pomocí využití optických vláknových sensorů.

## 2.2 Důvody měření teplot pomocí neelektrických teplotních senzorů

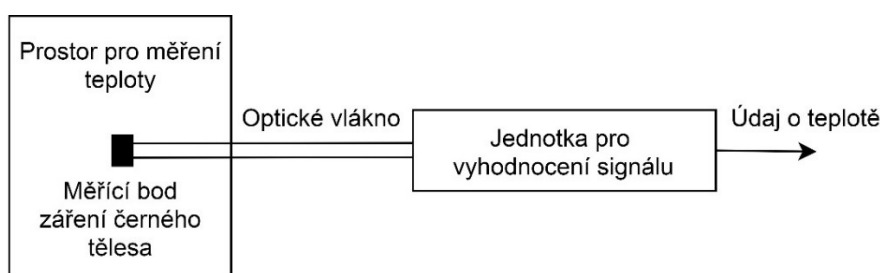
Výše uvedené obecně známé principy měření teplot mohou být nevýhodné pro případy, ve kterých je potřebné měření teplot v elektricky nebo magneticky rušeném prostředí. Jedná se především o průmyslová prostředí v například oblasti elektráren, elektromotorů, transformátorů či elektrického svařování. Popřípadě v biomedicínské problematice se může jednat o možnost využití měření teplot pomocí optických metod v oblasti využití magnetické rezonance. Použití opticky vláknových teplotních detektorů přináší kromě odolnosti vůči rušení také možnosti galvanického oddělení měřicího systému. Tato vlastnost měřicího řetězce může přinášet zjednodušení měření teplot ve vysokonapěťových transformátorech a motorech, či použití ve výbušném prostředí. V těchto průmyslových aplikacích se může dosahovat pracovních teplot, které se mohou přibližně pohybovat v rozsahu od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  až k  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Využití vyhodnocovacího řetězce za pomoci principů využití optických vláken musí být provedeno tak, aby se co nejvíce blížilo výhodám použití termočlánků, které umožňují kontaktní měření teplot v širokém teplotním rozsahu. Použitím optických vláknových senzorů by se mělo dosáhnout odstranění nevýhod, které se vyskytují u teploměru založených na elektrických principech. Avšak řešená problematika měření pomocí optického vlákna má i přes své výhody také určitá úskalí související především s vyhodnocením měřeného signálu pro pokrytí měření teplot v širokém teplotním rozsahu. Právě tato problematika je předmětem řešení této práce. Problematikou převodu optického signálu na měřenou teplotu za pomoci využití luminiscenčního signálu se zabývá článek [2]. Článek [3] se věnuje měření s fluorescentním materiálem od  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zabývá se časovou vyhodnocovací metodikou. Článek [4] se zabývá měřením za pomoci využití rubínového krystalu. Jednalo se o experiment měření od  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Optickým principem měření teploty pomocí safíru a využití spektrometru se zabývá článek [5]. Popisuje využití optického interferometru, věnuje se měření teplot od  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Měření teplot pomocí optických měřicích principů lze rozdělit do několika základních způsobů. Myšlenkou kombinace metod se zabývá článek [6]. Následující části uvedené kapitoly uvádí popis jednotlivých možností měření teplot pomocí optických metod.

## 2.3 Využití měřicích principů záření černého tělesa

Prvním měřicím způsobem je využití samotného skleněného optického vlákna, ve kterém je jeden konec určen pro připojení k fotodetektoru. Druhý konec vlákna je pak umístěn v požadovaném místě měření teploty. Tento způsob využívá principu záření tělesa s nenulovou povrchovou teplotou „blackbody radiation“ zkráceně BBR. [MM2] Množství energie a spektrum emitovaného záření pak závisí na teplotě povrchu měřeného tělesa. Takto emitované záření lze snadno použít pro optické měření teploty těles, ve kterých celková vyzářená energie podle Stefan-Boltzmannova zákona roste v závislosti na absolutní teplotě se čtvrtou mocninnou. Podle rovnice (2.1), kde  $\sigma$  je Stefan-Boltzmannova konstanta,  $T$  označuje měřenou teplotu v jednotkách  $^{\circ}\text{K}$ ,  $E$  je výsledná energie. Jedná se o známý princip měření, který je demonstrován při mnoha testovacích měření. Tyto testovací měření za pomoci využití tohoto měřicího principu lze nalézt v uvedených referencích tohoto tématu [7].

$$E = \sigma T^4 \quad (2.1)$$

Tato uvedená metoda patří mezi nejjednodušší způsoby měření teploty pomocí optického vlákna. Schématické zapojení principu měření je uvedeno na Obr. 1. Za pomoci minimálních finančních nákladů je možné sestavit fotodetektor s teplotním rozsahem přibližně 400 °C až 1200 °C. Při řešení vždy záleží na konkrétním typu použitého fotodetektoru. Toto úskalí souvisí s vlnovou délkou, kterou je fotodetektor schopen snímat. Přijímané světlo je generováno principem záření černého tělesa. Takový měřicí systém se skládá ze tří základních částí. Optické vlákno, ukončení vlákna v místě záření černého tělesa, vyhodnocovací jednotka signálu. Znázorněno na Obr. 1. [7] [MM2]. V této práci se tato problematika vyskytuje v oblastech zpracování signálu pro měření vyšších teplot.



Obr. 1 Schématické zapojení pro využití měření teplot pomocí optické metody záření černého tělesa

## 2.4 Luminiscence

Dalším principem měření teplot pomocí optiky je metoda využívající princip luminiscence a fluorescence. [8] [9] Jedná se o metodu vyžadující generátor světelného výkonu. Světlo z jednoho konce vlákna musí dopadat na vybraný luminiscenční materiál. Údaj o teplotě pak reprezentuje teplotně závislá odezva vybuzeného světla na fotodetektoru. Na konci vlákna je fotodetektorem zpětně přijatý světelný signál z krystalu, který je závislý na generovaném světle a velikosti teploty v požadovaném místě měření. Luminiscenční materiály se významným podílem uplatňují v osvětlovací technice, oblasti detektorů záření, obrazovek, výbojek, laserů atd.

Při luminiscenci lze měřit vybuzečné spektrum a intenzitu vybuzeného světla, popřípadě lze měřit dobu života vybuzených elektronů, což je doba po kterou produkuje krystal světelný výkon při přerušení budícího světla. [MM2] Pro tuto práci má největší význam luminiscence, která vzniká v dopovaných krystalických materiálech. Úroveň luminiscence v těchto materiálech závisí na množství příměsí v materiálu a jeho celkovém složení. Většinou mezi příměsí krystalu patří chrom. Materiály, které vykazují teplotní luminiscenční závislosti a změny doby života vybuzených elektronů v závislosti na okolní teplotě jsou: Chromem dopovaný safír, alexandrit, Cr:LiSAF, Cr:YAG, Nd3+:YAG. Dále různé fosfory, jako je rubín (Cr dopovaný Al2O3), spinel (Cr dopovaný MgAl2O4), alexandrit (Cr dopovaný BeAl2O4) a Emerald (Cr dopovaný Be3Al2Si6O18) [10] [11].

Luminiscenční děj lze popsat následujícím způsobem. V případě poskytnutí budícího světla do krystalického luminiscenčního materiálu dojde k přesunu elektronů do energetické hladiny (S1),

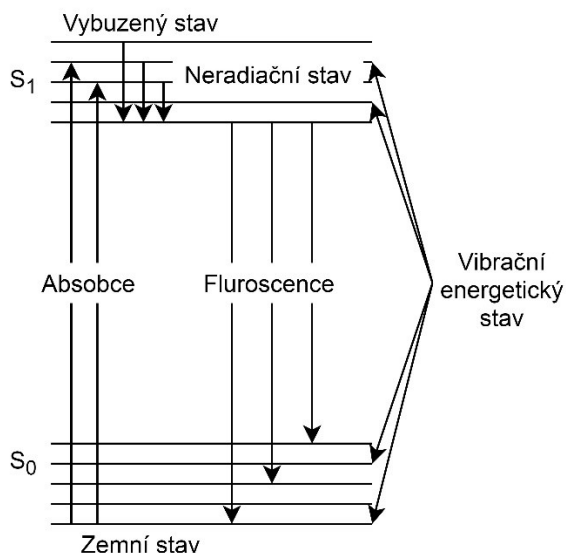
v této hladině se neudrží a přechází do druhé energetické hladiny. Orbitální elektrony molekul mohou tedy existovat ve dvou hlavních stavech. Prvním stavem je zemní „ground“ stav ( $S_0$ ) a stav vybuzený „excited“ ( $S_1$ ).

V případě, když dojde k osvětlení určitých molekul v krystalu, orbitální elektrony absorbují světelnou energii. Elektrony v těchto systémech tedy přecházejí ze stavu „ground“ ( $S_0$ ) do stavu excited“ ( $S_1$ ).

Protože tyto molekuly jsou schopné fluorescence, elektrony nyní přejdou z nejnižší úrovně energie vzrušeného do stavu, na rozdílné vibrační úrovně energie zemního stavu prostřednictvím emisí specifické kvantové energie ve formě světla. Toto světlo takto vyzařované výsledky mají za následek fluorescence. Princip je uveden na Obr. 2. [2].

Fluorescence je časově závislá a po vypnutí budícího světla po krátkém čase uplyne. Budící světelný zdroj je možné modulovat obdélníkovým pulzem a střídat tak zapnutí a vypnutí budícího světla. V závislosti na teplotě luminiscenčního materiálu se mění doba, po kterou trvá dosvit fluorescence. Životnost fluorescence se vztahuje na průměrný čas, po který molekula zůstává ve svém excitovaném stavu před vyzařováním fotonu. Fluorescence obvykle vyplývá z rovnice (2.2) kde  $I$  je intenzita fluorescence v čase  $t$ ,  $I_0$  je počáteční intenzita fluorescence,  $\tau_0$  je doba života fluorescence [12].

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right) \quad (2.2)$$



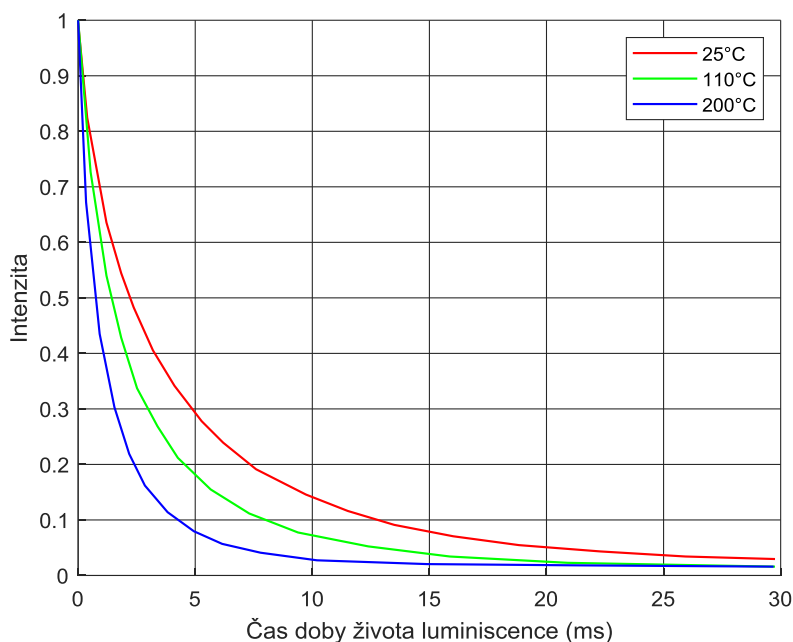
Obr. 2 Princip generování fluorescence [2]

Doba života emisní spektrální čáry je řádově v jednotkách ms. Názorně lze situaci po maximálním vybuzení krystalu vidět na Obr. 3 zobrazující křivku rozpadu fluorescence. Z obrázku grafu názorně



vyplývá, že s rostoucí teplotou je doba života náboje kratší. Dohasínání fluorescence trvá při vyšší teplotě kratší dobu.

Při luminiscenčním principu měření je možné aplikovat různé vyhodnocovací metody. Tyto metody jsou založené na měření maximálních amplitud, nebo na principech měření doby luminiscenčního dosvitu. [13] Je potřeba zohlednit silný vliv nelinearit při vyhodnocení a převodu optického signálu na výslednou teplotu [2] [3].



Obr. 3 Křivka doby dosvitu luminiscence [2]

## 2.5 Měření pomocí Braggovských mřížek

Třetí oblast měření pomocí optických vláken se zabývá problematikou měření za pomoci využití Braggovských mřížek. Jedná se o princip měření, který je založen na změně indexu lomu v jádře optického vlákna. Princip této měřicí metody spočívá v průchodu světla přes periodicky modifikované optické vlákno tak, aby docházelo k periodické, nebo kvaziperiodické změně v indexu lomu v optickém vlákne. Aby toto měření bylo realizovatelné, tak je důležité dodržet Braggovskou podmínku, která se týká změny periody indexu lomu. Pokud je na FBG přivedeno širokospektrální spektrum světla, tak je centrální vlnová délka světla z FBG odražena zpět a zbylé světlo projde skrze FBG beze změny. S použitím jednoho optického zdroje a spektrometru lze sledovat velké množství FBG. Tímto lze měřit teploty na více místech. Nevýhodou tohoto řešení je teplotní stabilizace světelného zdroje a spektrometru. Zapojení pro měření pomocí FBG skládá pouze z optického zdroje, spektrometru, děliče a FBG mřížky. Tento princip měření nebude v této práci dále uváděn. Nejedná se o principy měření, kterým se zabývá problematika této práce. Téma této metody měření je uvedeno v těchto článcích [14] [15].

### 3 Problematika měření teploty za pomoci vláknových optických snímačů

Při běžném použití optického vlákna v telekomunikačním průmyslu se většinou přes optické vlákno převádí binárně kódovaný signál. Při přenosu signálu přes optické vedení dochází k útlum signálu. To se projeví změnami amplitud signálu mezi přijímací a vysílací částí. Změny úrovně amplitud signálu, které mohou vznikat na přijímací části vlivem různé délky, typu či ohybu vlákna nemají značný význam na straně světelného detektoru při digitálním zpracování. Pokud je signál přijatý fotodetektořem v definovaných mezích amplitud, tak je správně pomocí rozhodovacích úrovní dekodován na digitální signál. Mírná změna amplitudy signálu mezi vysílací a přijímací jednotkou pro přenos informace pomocí optického vlákna v tomto případě nemá význam a přenos digitální informace není zatížen chybou. V těchto případech se tak jedná o bezkonkurenční řešení pro přenos digitálních informací pomocí optického vlákna na dlouhé vzdálenosti i v magneticky a elektricky rušeném prostředí. Tato práce je však zaměřena na popis problematiky využití analogového digitalizovaného signálu, který je pak dále zpracováván za účelem převodu opticky přijatého signálu na údaj o měřené teplotě.

Návrh metodiky pro optické vláknové senzory musí počítat s použitím několika měřících metod. Dle dostupných informací z odborných publikací [16] [17] [18], které se zabývají metodikou vyhodnocení signálu z vláknových optických senzorů, není možné využít pouze jednu metodu pro pokrytí požadovaného teplotního rozsahu měření od teplot  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  či více. Při luminiscenčním principu měření je možné aplikovat vyhodnocovací metody, které jsou založené na principu měření maximálních amplitud, nebo na principech měření doby luminiscenčního dosvitu po vypnutí budícího světla.

Každá měřící metoda se vyznačuje svými specifickými oblastmi použití v rozsahu měřících teplot a přesnosti měření. Například článek [19] uvádí využití luminiscenčního měření pouze v rozsahu od  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jedná se o řešení s fluorescenčním teplotním senzorem zapouzdřeném v dutém vlákně. Další článek [20] využívá senzor teploty fluorescenčního optického vlákna s využitím viditelných vlnových délek pro teplotní rozsah  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V současné době princip měření teplot za pomoci optických vláken není pro běžné využití příliš využíván. Přesto přináší výhody zejména z hlediska odolnosti vůči magnetickému a elektrickému rušení. V průmyslových aplikacích se lze pro měření teplot setkat s použitím optických měřících metod, které využívají speciální struktury vláken Braggovských mřížek, nebo luminiscenčního měření, jak uvádí zdroje [21] [22].

Problematika této práce se zaměřuje na specifikaci vyhodnocovacího algoritmu pro získání informací o měřených teplotách za pomoci využití přenosu analogového optického signálu. V těchto případech je nutné znát přesný útlum použitého optického vlákna v uvedeném měřícím řetězci. Uspořádání celého měřícího systému je potřeba určit velice podrobně, včetně koncové polohy a způsobu umístění vlákna, které přenáší měřený signál. Jelikož změny amplitud nesou informaci o měřené teplotě, je předpoklad, že každý takto vytvořený senzor po sestavení vyžaduje kalibraci pro jeho celý měřený měřící rozsah. Pro kalibraci takového teplotního senzoru je potřeba znát kalibrační křivky [2].

Kalibrace uvažovaného senzoru v měřicím řetězci není jednoduchou záležitostí. Měřený signál není funkcí pouze teploty a budicího signálu.

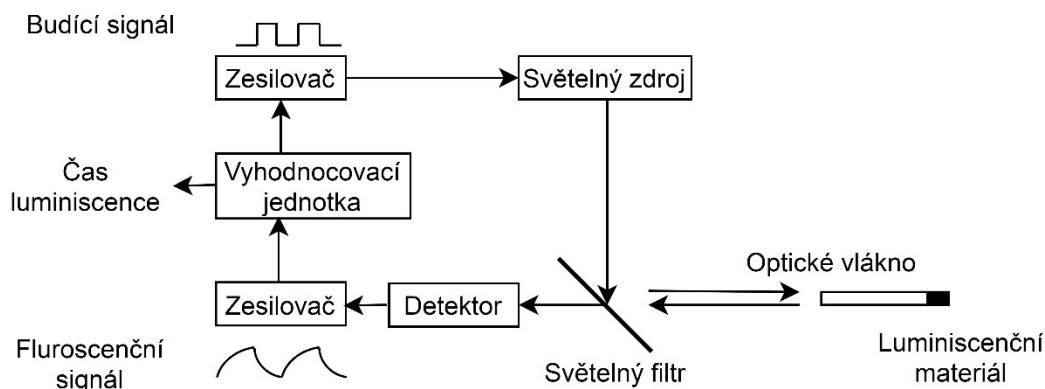
Luminiscenční signál závisí také na následujících aspektech:

- Typ světelného zdroje.
- Napojení vlákna na světelný zdroj.
- Napojení luminiscenčního materiálu na optická vlákna.
- Napojení vlákna na fotodetektor.
- Použití spektrálního filtru pro luminiscenční signál.
- Teplota fotodetektoru.
- Typ použitého vlákna.
- Mechanická stabilita umístění vlákna.

Optický teplotní měřicí řetězec pak dále ovlivňují také parazitní teplotní závislosti fotodetektorů, které mají vliv na polovodiče použité v zapojení vyhodnocovací jednotky optického signálu. Jedná se o teplotně závislý polovodičový světelný zdroj, fotodetektor a vyhodnocovací zesilovač. Tyto teplotní závislosti lze vhodně kompenzovat při znalosti teploty zdroje led budicího světla, fotodetektoru a vyhodnocovacího zesilovače. Informace o těchto parazitních teplotách je vhodné zahrnout do výsledné rovnice přepočtu měřené teploty z naměřených optických údajů fotodetektoru. Jedná se však také o vyšší složitost vyhodnocovacího algoritmu. V takovýchto případech musí být teplota elektroniky a polovodičových součástek měřena s garantovanou požadovanou přesností. Při sestavení měřicího celku za pomoci optických vláken však nemusí být zcela jasné, jaké mechanické nedostatky vznikly při sestavování vláknového snímače. Také nemusí být jednoznačné, jaké přesné vlastnosti bude vykazovat použitý luminiscenční materiál. Při každém sestavení nového měřicího řetězce je potřeba uvažovat o vhodné kalibraci vláknového snímače. Tuto kalibraci je vhodné provést při konstantní teplotě vyhodnocovací jednotky, aby nebyl do kalibračního procesu vnesen vliv parazitní teplotní závislosti součástek vyhodnocovací elektroniky.

Systém pro měření teplot, který využívá luminiscenční měření, se obvykle skládá z vyhodnocovací jednotky, zesilovače budicího signálu, světelného zdroje, světelného filtru, fotodetektoru a fluorescenční sondy připojené pomocí optických vláken. Fluorescenční materiál je umístěn na čelní straně optického vlákna. Do materiálu vstupuje budící světlo, výsledkem je viditelné světlo s fluorescenčního materiálu, jehož maximální amplituda a doba doznívání luminiscenčního vybuzeného náboje je závislá na míře vybuzení a teplotě materiálu. Sonda snímače je v přímém kontaktu s měřeným objektem. Fluorescenční teplotně závislý materiál a další optoelektronické systémy jsou propojeny s optickým vláknem. Sestrojením takového teplotního senzoru za pomoci využití tohoto principu je možné měřit teploty, které se nachází pod rozsahem teplot, které je možné měřit pomocí metod záření černého tělesa [2].

Systém měření teploty pracuje následujícím způsobem: Řídicí jednotka generuje obdélníkový signál pro buzení budící led diody. Budící světlo generuje fluorescenční signál, který se přenáší zpět do vlákna a posléze k fotodetektoru přes optický světelný filtr pro danou vlnovou délku světla. Slabý proud získaný fotoelektrickou konverzí pak musí být zesílen zesilovačem. Schéma zapojení včetně tvaru budících a vysílacích průběhů je znázorněno na principiální schéma měření uvedeném na Obr. 4. Uvedená problematika vychází z příspěvku [2].

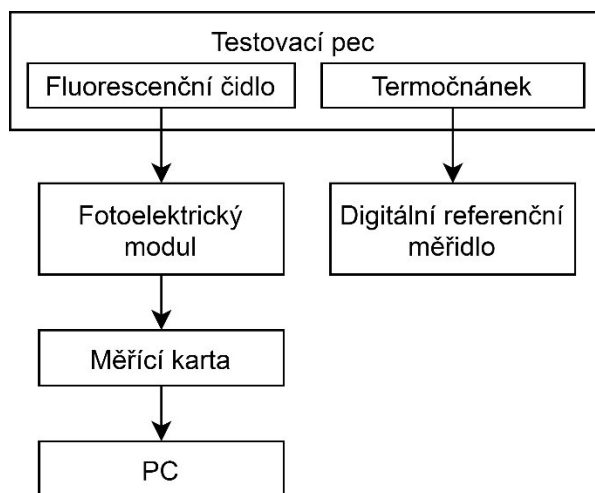


Obr. 4 Principiální schéma konfigurace systému měřicího systému pro měření pomocí luminiscenční časové metody [2]

### 3.1 Současný stav poznání v oblasti luminiscence

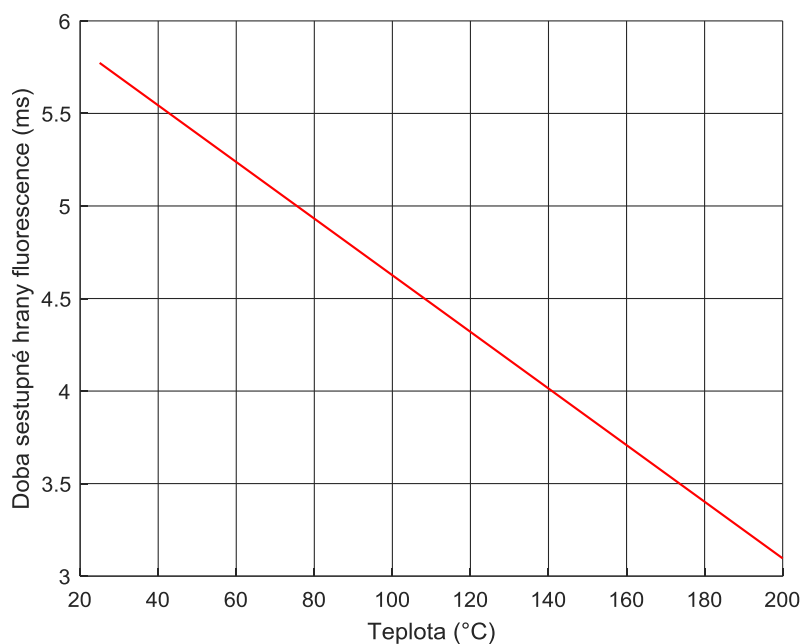
Tato část práce uvádí několik publikovaných experimentálních měření, která se zaměřují na vyhodnocení teploty pomocí luminiscenčního signálu. Jedná se o měření maximální amplitudy a měření doby života luminiscence.

Publikace [2] se zaměřuje na experimentální měření v rozsahu od 25 °C až 200 °C. Zapojení experimentu znázorňuje Obr. 5.



Obr. 5 Experimentální systém snímáče teploty fluorescence [2]

Výsledek měření ukazuje normalizovaná útlumová křivka fluorescenčního signálu při různých teplotách. Je zřejmé, že rychlost rozpadu fluorescenčního signálu je spojena s teplotou, čím vyšší je teplota, tím rychleji se signál z fluorescence utlumí. Je dokázáno, že existuje lineární vztah mezi dobou trvání fluorescence po vypnutí budícího světla pro teplotní rozsahy přibližně 25 °C až 200 °C. Teplotní měřicí rozsah závisí na typu použitého budícího materiálu a typu budícího světla, dle publikací [2] [3].



*Obr. 6 Teplotní závislost doby dosvitu luminiscence [2]*

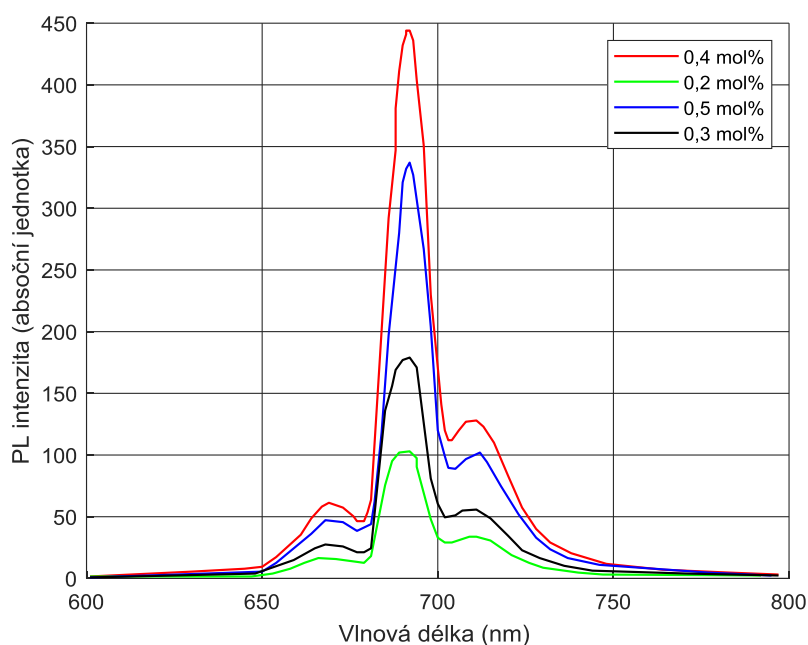
Jak je uvedeno výše zobrazeno v grafu uvedeném na Obr. 6, teplota se zvyšuje z 25 °C na 200 °C, současně se snižuje životnost fluorescence z 5,773 ms na 3,096 ms. Teplotní citlivost je přibližně 0,015 ms / °C. Jak lze vidět z křivky doby dosvitu luminiscence viz. Obr. 3 v předchozí kapitole, existuje vztah teplotní časové luminiscenční závislosti. Dále publikace uvádí provedené měření stability při pokojové teplotě 22,9 °C po dobu 300 sekund. Výsledky ukazují kolísání životnosti fluorescence, které jsou menší než 0,002 ms. Délka měření byla stanovena 300 s. Citlivost převodu vstupního optického signálu na údaj o teplotě je asi 0,13 °C [2]. Jednalo o měření v laboratorních podmínkách.

Další experimentální měření dle článku [3] ukazuje experimentální měřicí systém, u kterého experimentální výsledky při luminiscenčním měření ukázaly, že chyby standardní odchylky o teplotě 0,45 °C v rozmezí teplot 0 °C až 90 °C. Pro uvedená experiment byla vybrána tři druhy fluorescenčně citlivých materiálů. Jedná se o zinek dopovaný Mn<sup>2+</sup> + sulfid (ZnS: Mn<sup>2+</sup>), Eu<sup>3+</sup> + dopovaný oxid yttritý (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Eu<sup>3+</sup>), a Mn<sup>4+</sup> + dopovaný oxyfluorid germanat.

Jiný experiment publikovaný v článku [23] „Low temperature measurement using fluorescence thermometry“ uvádí měření pomocí luminiscence pro záporné teploty. V tomto příspěvku byla zkoumána možnost měření při nízkých teplotách za použití fluorescenční termometrie. Jako luminiscenční materiál byl použitý chromový ion dopovaný safírový křišťál (rubín), který je známý

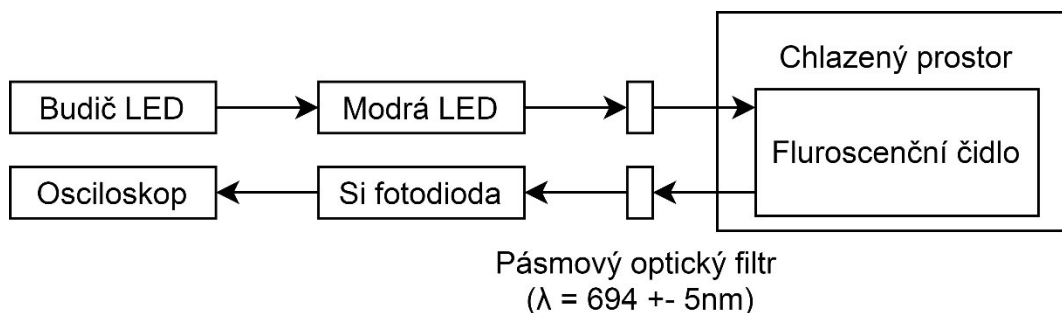
jako vhodný senzorový materiál pro měření teploty. Vztah mezi fluorescenční vlnovou délkou z jednotlivých krystalů a luminiscenční intenzitou udávanou jako PL uváděnou na Obr. 7. Maximální hodnoty PL jsou při vlnové délce  $\lambda = 694$  nm pozorovány pro různé rubínové krystaly. Fluorescenční spektra z uvedených krystalů byly měřeny mezi 500 nm až 800 nm. Také článek [12] udává totožnou vlnovou délku pro měření pomocí rubínového krystalu v záporných teplotách záporné teploty.

Další články [24] [25] se zmiňují o závislosti měření intenzity luminiscence PL vůči konstantnímu vybuzenému signálu při závislosti na použitém luminiscenčním materiálu. Termo senzor s krystalem granátového dopadu Cr (YAG) je vhodný pro fluorescenční teploměr. Maximální intenzita PL s teplotou klesá. Poměr intenzity PL maximálních intenzit se lineárně zvyšuje. Výsledky měření pro jednotlivé krystaly s koncentracemi Cr 0,2, 0,3, 0,4 a 0,5% jsou znázorněny na Obr. 7 Dle informací z publikací [23].



*Obr. 7 Luminiscenční závislost dle závislosti koncentrace chromu v krystalu [23]*

Z tohoto výzkumu se rubínový krystal jeví jako užitečný materiál pro fluorescenční metodu měření. V tomto popisovaném řešení uváděném ve článku byla luminiscence buzena pomocí modré led diody. Příjem signálu byl realizován pomocí křemíkové fotodiody. Luminiscenční signál byl na fotodetektor přiváděn přes optický filtr o vlnové délce  $\lambda = 694$  nm  $\pm$  5nm. Testovací zapojení je uvedeno na Obr. 8.



Obr. 8 Schéma realizovaného testovaného zapojení v článku [23]

Teplotní závislost fluorescence z rubínových krystalů byla měřena v chladné lázni, kdy byl rubínový krystal ponořen do chladiva. Měřená teplota byla změněna v rozmezí od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Teplotní závislost doby života luminiscenčního náboje pro rubínové krystaly byla změřena a vypočítána citlivost odpovídá teplotnímu koeficientu  $11\text{ }\mu\text{s} / ^{\circ}\text{C}$ . Z výsledku vyplývá, že rubínový senzor je vhodný pro měření teploty v rozmezí  $-40^{\circ}\text{C}$  až  $80^{\circ}\text{C}$ . Rubínový krystal s chromovými ionty o koncentraci 0,4 mol% se jevil jako vhodná volba pro teplotní čidlo díky vysokému poměru PL a intenzity. Doba života PL u rubínu lineárně poklesne s teplotou ze 4,7 ms při  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  na 3,3 ms při  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Přesnost měření rubínového snímače byla zjištěna menší než  $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  [23].

### 3.2 Komerčně dostupná zařízení pro měření teplot pomocí optiky v průmyslových aplikacích

Pro měření teplot pracujících za pomoci optických principů existují průmyslově dostupné řešení. Ty se využívají v průmyslových aplikacích, ve kterých je nutno eliminovat především následující vlivy:

- Magnetická a elektrická rušení.
- Přenos signálu na delší vzdálenosti.
- Galvanické oddělení.
- Použití ve výbušném prostředí.

Průmyslové oblasti, které vyžadují tyto specifické požadavky:

- Transformátory vysokého napětí.
- Frekvenční měniče.
- Střídavé motory.
- Chemický průmysl.
- Lékařství pro použití v oblasti magnetické rezonance.

Pro některé aplikace, které se vyznačují těmito charakteristikami, je pak možné využít například následující zařízení SITRANS TO500. Toto inovativní zařízení bylo uvedeno na trh v roce 2017. Zařízení TO500 je 4 kanálový systém, které na každém ze svých kanálů umožňuje vyhodnotit 48 měřených bodů [21] [22]. Technologie SITRANS TO500 je založena na takzvaných optických vláknech Braggovských mřížek, které jsou uspořádány v individuálně definovaných bodech snímače. Vysílač vysílá světelné vlny do čidel s optickými vlákny a vyhodnocuje teplotu na základě modifikovaného signálu pomocí využití Braggovské mřížky. Ve vysílači se generuje světlo o vlnové délce 1500 až 1600 nm a je vydáváno k senzorové měřicí sondě pomocí plynule laditelného laserového světla. Každé vlákno Braggovské mřížky odráží světlo s definovanou vlnovou délkou. Odraz na přijímaného světla o modifikované vlnové délce z Braggovských mřížek nese informaci o teplotě v příslušném měřicím bodu.

Tento měřicí systém vyžaduje speciální vlákna se strukturou Braggovských mřížek. Dle použitých typů je schopen měřit teploty od  $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$  [21] [22].

Nevýhoda tohoto řešení spočívá v nutnosti použití speciální Braggovské struktury a limitu maximální možné teploty, která je ovlivněna limity Braggovských mřížek.

Tyto limity by mohla nahradit možnosti využití senzorů s možností využití principů kombinací luminiscenčního měření a principů záření černého tělesa.



*Obr. 9 Měřicí zařízení SITRANS TO500 [22]*



## 4 Formulace cílů disertační práce

Na základě rešerší byly zjištěny informace o způsobech měření teplot za pomoci využití optických metod. Uvedené citované zdroje v rešeršních částech této práce uvádí možnosti použití jednotlivých vyhodnocovacích metod pro účely měření teplot za pomoci využití optických vláken. V prostudovaných případech o problematice optického měření teplot se jednalo především jen o laboratorní využití tohoto optického teplotního sensoru. Jednotlivé optické metody jsou však většinou vhodné pouze k měření úzkého teplotního rozsahu. Bylo zjištěno, že pro sestavení teplotního optického sensoru, který umožní pokrytí širokého teplotního měřicího rozsahu, je potřebné využívat propojení kombinace jednotlivých vyhodnocovacích optických způsobů. Je tedy nutné navrhnout měřicí vyhodnocovací řetězec tak, aby umožňoval zpracování optického signálu pomocí užití kombinace jednotlivých vyhodnocovacích metodik v rámci jednoho měřicího řetězce. Hlavním cílem práce je připravit vyhodnocovací metodiku pro vyhodnocení teplot z širokého teplotního rozsahu. Cíle práce lze rozdělit na následující části:

- Zhodnocení možností měření teplot v širokém teplotním rozsahu.

Ověření zhodnocení možností a postupů umožňující měření teplot pomocí optických metod v širokém teplotním rozsahu od  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$  pro dostupnou teplotní optickou sondu. Na základě rešerší lze předpokládat, že optický signál reprezentující teplotu v měřicím bodu nebude umožňovat vyhodnocení teploty s totožnou přesností v celém teplotním rozsahu.

- Vývoj algoritmu pro přepínání jednotlivých optických vyhodnocovacích metod v závislosti na optickém vstupním signálu.

Na základě analýzy vstupních dat z použité testovací teplotně závislé optické sondy je potřebné zjistit použitelnost signálu využívající luminiscenčního principu vyhodnocení a principů využívajících metod záření černého tělesa. Za pomoci optického luminiscenčního signálu lze údaj o teplotě získávat pomocí použití metodik pracujících na principech měření doby poklesu vybuzečné luminiscenční amplitudy a ustálené velikosti amplitudy při vybuzečné luminiscenci. Cílem je ověřit teplotní využitelnost rozsahu měření teplot pomocí jednotlivých optických metod a stanovení algoritmů umožňující přepínání vyhodnocovacích metod pro měření teplot v širokém teplotním rozsahu. Je potřebné stanovit novou metodiku vyhodnocení dat pro navrhovaný měřicí řetězec tak, aby využívala dynamické přepínání vyhodnocovacích metod podle závislosti vstupního optického signálu. Lze očekávat, že stanovení vhodné vyhodnocovací metodiky zpracování signálu bude určitým kompromisem mezi použitím jednotlivých vyhodnocovacích metod.

- Posouzení výsledků vyvinutého algoritmu pro měření teplot pomocí kombinace optických metod pro využití v širokém teplotního rozsahu.

Jedná se o ověření výsledků navrženého řešení využívajícího kombinace vyhodnocovacích optických metod. Cílem je porovnat přesnost navržených vyhodnocovacích principů a kombinace metod.

## 5 Sumarizace a zhodnocení možnosti měření teplot pomocí opticky teplotně závislého signálu

Na základě rešeršních článků uvedených v úvodních kapitolách této práce bylo zjištěno, že dostupný signál z teploměrů využívající optických měřicích principů lze vyhodnocovat za pomoci využití několika možných způsobů zpracování vstupních dat z optických sensorů. Je zřejmé, že pro návrh metodiky měření pomocí optických metod v širokém teplotním rozsahu bude potřeba využít sloučení těchto metod.

Každý z uvedených vyhodnocovacích způsobů se vyznačuje svými specifickými limity využití. Hlavními limitními možnostmi jednotlivých vyhodnocovacích způsobů jsou možnosti využití měřicích metod pouze pro užití v úzkém teplotním měřicím rozsahu. Je tedy možné obecně shrnout problematiku měření teplot pomocí optického vstupního signálu následovně. V případech, ve kterých je potřeba využít optických metod pro měření teplot pod bodem mrazu, nebo pro užití v nízkých teplotních oblastech, které neumožňují využití principů založeném na principu využití záření černého tělesa, je nutné pro tyto případy využít luminiscenčních měřicích principů nebo principů měření, které využívá měření za pomoci Braggových mřížek. Je však potřeba připomenout, že použití signálu z Braggových mřížek není v této práci popisováno. Důvodem je, běžně neumožňují použití pro velmi vysoké teploty. Naopak využití principů převodu teplot pomocí optických metod záření černého tělesa je principiálně možné pouze v případech, ve kterých je možné zaručit dostatečný teplotní rozdíl mezi teplotou v požadované měřicí oblasti a teplotou, která je v oblasti fotodetektoru. Prakticky je však tato metoda využitelná přibližně pro teploty od 300 °C a výše. Vždy závisí na typu použitého optického fotodetektoru.

Využití luminiscenčního sensoru pro praktické použití není jednoduchou záležitostí, jelikož při sestrojení vlastních vzorků optického teploměru může docházet k nepřesnostem umístění luminiscenčního materiálu na rozhraní krystal-vlákno, což má pak vliv na zkreslení optického signálu. Také je známo, že vlivem použití různé délky, tvaru a ohybu optického vlákna dochází ke změnám přenosu signálu z optického vlákna. Předpokládá se, že každý takto sestrojený optický sensor bude vyžadovat kalibraci signálu. Použití vyhodnocovací metodiky pro vstupní data s opticky závislého teplotního měřicího řetězce je také vždy závislé především na těchto aspektech:

- Volba luminiscenčního materiálu.
- Konstrukční uspořádání sensoru.
- Použité optické části (fotodetektory, budící led diody, filtry optického signálu pro luminiscenční použití).
- Citlivost měřicího fotodetektoru a parametry zesilovače.
- Citlivost a přesnost A/D převodníku použitých pro digitalizaci signálu.
- Přesnost a citlivost časového měření pro využití v časové luminiscenční oblasti měření.

Tato práce se zabývá problémem, který má za úkol zhodnotit možnosti optického měření teplot pro široký teplotní měřicí rozsah, ve kterém je potřeba uvažovat o přepínání vyhodnocovacích metod. Kvůli možné myšlence o využití kombinace jednotlivých metod pro měření širokého rozsahu teplot je nutné, aby vstupní digitalizovaný signál z optického měřicího řetězce pro každou část měřicí teplotní oblasti obsahoval informaci, kterou je možné analyzovat a lze ji vhodně převést na měřenou teplotu. Je problematické zaručit přesnost měřicího řetězce pro celý teplotní měřicí rozsah s konstantními parametry. Tento problém nastává k vůli dále uvedeným bodům týkajících se jednotlivých metod měření. Požadavky, limity přesnosti a použitelnosti jednotlivých vyhodnocovacích metod, pro metodiku umožňující měření teplot za pomoci optických metod pro měření v širokém měřicí rozsahu teploty jsou rozděleny následovně.

#### Metoda záření černého tělesa

- Údaj o teplotě je funkcí energie záření černého tělesa.
- Limit použitelnosti měření od teploty přibližně 300 C° a výše, dle použitého typu fotodiody.
- Exponenciální průběh signálu v závislosti na teplotě.
- Metoda záření černého tělesa může negativně ovlivňovat použitelnost luminiscenční metody na rozhraní použití těchto metod.

#### Metoda luminiscenčního měření - časová metoda

- Vyžaduje budící světlo.
- Vyžaduje světelný filtr z důvodu oddělení budícího a luminiscenčního světla.
- Limit použitelnosti měření od teploty do 400 C°, dle použité fotodiody filtru.
- Údaj o měřené teplotě je teplotní funkcí délky doby poklesu amplitudy luminiscenčního signálu po ukončení buzení luminiscence.
- Vyžaduje přesné časové měření, adekvátně přesný způsob pro měření doby poklesu signálu.
- Umožňuje měření pouze v omezeném teplotním rozsahu.
- Pro přepočet signálu je potřebné určit maximální amplitudu před vypnutím luminiscenčního buzení.
- Je potřebné vhodně stanovit prahové úrovně pro měření času doby poklesu amplitudy.
- Je potřebné vhodně stanovit prahové úrovně pro měření času doby poklesu, tak aby signály nebyly ovlivněny vzájemně metodou záření černého tělesa.

#### Metoda Luminiscenčního měření - amplitudová metoda

- Údaj o teplotě je funkcí amplitudy luminiscenčního signálu.
- Vyžaduje světelný filtr z důvodu oddělení budícího a luminiscenčního světla.

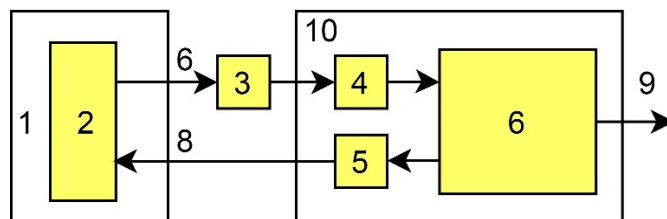
- Umožňuje měření pouze v úzkém teplotním rozsahu. Dle konstrukce sondy a vyhodnocovací elektroniky.
- Důležité stanovit přesnou kalibraci maximální amplitudy při známé definované teplotě.
- Pro přepínání mezi přepínání mezi časovou a amplitudovou vyhodnocovací metodou je potřebné navrhnout správný vyhodnocovací algoritmus s vhodně nastavenými limity pro kombinace metod a jejich přepínání.

## 6 Vstupní data pro návrh metodiky zpracování dat z optického vysokoteplotního senzoru

V rešeršních částech této práce byly popsány základní možné principy měření teplot pomocí optických měřicích metod. Na základě těchto článků bylo možné získat základní teoretické informace o měření pomocí optických metod. Jednotlivé články popisovaly testovací měření pro určitý teplotní měřicí rozsah. Článek [26] Studie systému monitorování teploty elektrického zařízení na základě optického vlákna a fluorescence uvádí sestavení optické sondy a měřicího systému s možnou přesností  $\pm 1$  °C. Avšak uvádí pouze teplotní rozsah od pokojových teplot do 270 °C. Testovací řetězec založený na bázi měření doby dohasínání fluorescence je popsán také v článku [27]. Také se ovšem jedná o omezený rozsah měřicích teplot od 0 °C do 300 °C. Předmětem řešení této práce je však nalezení metodiky měření pro uplatnění měření teplot v širokém teplotním rozsahu. Pro praktický návrh a zhodnocení možných vyhodnocovacích metod zpracování dat z optického vysokoteplotního senzoru bylo potřebné získat vstupní testovací data z konkrétní optické vysokoteplotní sondy, která využívá principů luminiscenčních metod a záření černého tělesa. Tato data byla získána za pomoci níže uvedené optické sondy, která je také zveřejněna jako užitný vzor. Podrobnosti jsou uvedeny v následující podkapitole. Další důležitou částí pro získávání vstupních dat pro řešení návrhu metod prezentované v této práci tvoří testovací měřicí řetězec. Sestavení optické vysokoteplotní sondy a testovacího měřicího řetězce není předmětem řešení této práce. Při zpracování a analýzy dat je důležité využití vhodného prohlížeče pro náhledy a vyobrazení měřených signálů. Zobrazování dat ve formě datových trendů je jednou z důležitých požadavků při zpracování dat. Pro tento základní účel byly využity nástroje virtuální instrumentace LabVIEW od výrobce National Instruments. Termín - zobrazení dat znamená uložení hodnot s časovým razítkem, které je nutné pro grafické zobrazení měřených hodnot. Požadované hodnoty jsou poté zobrazeny v grafech  $x$ ,  $y$ . Osy  $x$  obvykle reprezentují čas. Hodnoty osy  $y$  jsou hodnoty měřeného signálu. Tato problematika zobrazování dat je řešena v příspěvku. [MM3] Vstupní data z měřicího řetězce pro návrh vyhodnocovací metodiky byla ukládána do souboru CSV. Tato práce neřeší návrhy zobrazování dat, pouze se zabývá pouze analýzu teplotně závislých dat, která byla pomocí použité optické sondy a měřicího řetězce získána.

### 6.1 Zdroj vstupních dat pro návrh metodiky zpracování dat z optické sondy pro měření teplot v širokém teplotním rozsahu.

Data byla získána s optické měřicí sondy, která je popsána a publikována v užitém vzoru „Konstrukce vysokoteplotní sondy“ [28] a také v užitém vzoru s názvem „Vysokoteplotní sonda v pouzdře“ [29]. Tato sonda obsahuje rubínový krystal s napojeným optickým vláknem a tvoří základ pro další části měřicího systému pro měření teplot v širokém teplotním rozsahu za pomoci optických metod. Další prvky tohoto měřicího systému jsou tvořeny elektronickými částmi. Jedná se především o elektroniku s logaritmickým zesilovačem, fotodetektor a zdroj budícího světla pro luminiscenční měření. Tento měřicí řetězec je také uveden jako užitný vzor „Zařízení k měření teplot vysokoteplotním senzorem s označením 33 062“ [30]. Takto sestavené zařízení bylo připojeno k testovacímu měřicímu řetězci. Vysokoteplotní sonda se skládá z částí uvedených na Obr. 10.



Obr. 10 Konstrukce použité sondy jako zdroj vstupních teplotně závislých dat

- 1 - Pouzdro optické sondy.
- 2 - Rubínový krystal.
- 3 - Optický filtr.
- 4 - Křemíkový fotodetektor.
- 5 - Budící fotodioda.
- 6 - Elektronika s buzením fotodiody a měřicím zesilovačem.
- 7 - Přívodní optické vlákno teplotně závislého signálu ze sondy do fotodetektoru.
- 8 - Přívodní optické vlákno budícího signálu z buzení do optické sondy.
- 9 - Výstupní napěťový signál pro analýzu opticky teplotně závislých dat.
- 10 - Pouzdro měřicí elektroniky.

#### Použitý rubínový krystal

Aby bylo možné pomocí sondy zajistit měření nízkých teplot pomocí luminiscenčního měření, je v sondě umístěn rubínový krystal. Toto řešení zajišťuje dostupnost opticky teplotně závislého luminiscenčního signálu pro měření nízkých teplot, který bude možné analyzovat a detekovat pomocí metod založených na časovém a amplitudovém luminiscenčním vyhodnocovacím principu. Rubínový krystal je odolný vůči vysokým teplotám a díky tomu umožňuje koncepce využití také pro měření vysokých teplot, které jsou založeny na principu záření černého tělesa.

#### Pracovní vlnová délka luminiscenční metody

Vysokoteplotní sonda musí být z důvodu využití luminiscenčního principu buzena budícím světlem o vlnové délce 630 nm. K optickému fotodetektoru je přiváděn pouze filtrem oddělený optický signál vlnové délky, která je vyšší než 690 nm.

#### Optický filtr

Z důvodu luminiscenčního měření je potřebné oddělení budícího optického signálu, který je generován budící diodou od teplotně závislého luminiscenčního signálu generovaného z rubínového krystalu. Pro tento účel musel být před fotodetektorem vložen optický filtr, který odděluje vlnové délky světla, které jsou nižší než 690 nm.

#### Použitá vlákna

Pro přívod a odvod světelného signálu mezi optickou vysokoteplotní sondou, budícím zdrojem a fotodetektorem, byly využity skleněná vlákna o průměru jádra 600  $\mu\text{m}$ .

### Použitá budící dioda

Pro buzení luminiscenčního signálu z fotodetektoru je využito červené budící světlo z led-diody. Led dioda byla buzena elektronikou obdélníkovým proudovým signálem o frekvenci 4 Hz. Dioda generovala pulzní optický signál do použitého rubínového krystalu.

### Použitý fotodetektor

Jako použitý fotodetektor byla využita v měřicím systému křemíková fotodioda.

### Použitý zesilovač vyhodnocovací elektroniky

Vstupní luminiscenční signál z křemíkové fotodiody disponuje podstatně nižší úrovní amplitudy signálů než signál, který je získáván za pomoci metody záření černého tělesa v případě měření vysokých teplot. Aby bylo možné tento analogový signál v celém teplotním rozsahu digitalizovat s potřebnou přesností, tak je elektronika teplotní sondy vybavena logaritmickým zesilovačem, který přizpůsobuje tvar exponenciálního teplotně závislého vstupního signálu z fotodetektoru.

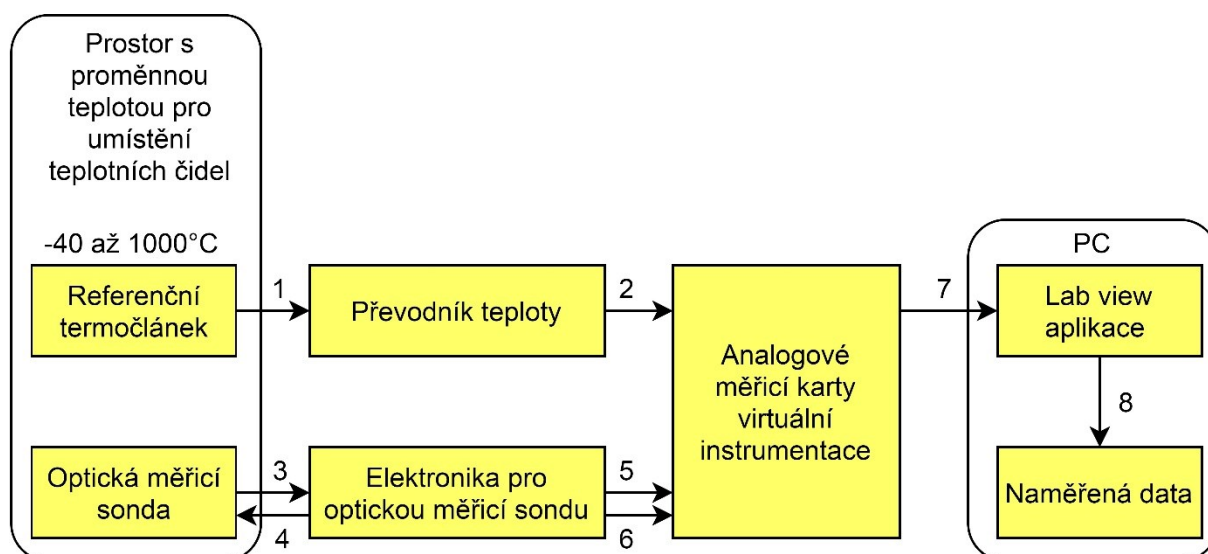
## 6.2 Popis měřicího systému pro získávání vstupních dat

Optický teplotní měřicí systém byl připojen k testovacímu měřicímu vyhodnocovacímu řetězci. Úkolem tohoto testovacího řetězce je zjistit teplotně závislý vstupní signál z optického teplotního sensoru, který využívá principy luminiscence a principů záření černého tělesa.

Hlavním úkolem tohoto systému bylo získat data z měřicího systému tak, aby bylo možné sestavit metodiku a rovnice pro přepočet dat z fotodetektoru na údaj o měřené teplotě.

Na testovací měřicí systém byly kladeny tyto požadavky:

- Referenční měření se musí provádět s požadovaným teplotním krokem.
- Je potřebné proměřit oblast širokého teplotního rozsahu.
- Data z optického teploměru musí být opatřena časovou známkou.
- Spouštění měření musí být provedeno na základě údajů s referenčního čidla teploty.
- Po dosažení teploty detekované za pomoci referenčního čidla se provádí záznam aktuálních dat.



Obr. 12 Blokové schéma způsobu měření vstupního signálu pro analýzu dat

- 1 - Vstupní signál z referenčního termočlátku.
- 2 - Vstupní signál z převodníku termočlátku napěťový rozsah 0 - 10V.
- 3 - Optický budící signál luminiscence do optického čidla.
- 4 - Optický signál z optického teplotního čidla.
- 5 - Napěťový signál z vyhodnocovací elektroniky optického signálu.
- 6 - Signál synchronizace budícího optického signálu pro luminiscenci.
- 7 - Spojení měřicích karet s vyhodnocovacím PC pomocí ethernetového rozhraní.
- 8 - Export naměřených dat.

Popis částí využitých pro referenční měření teploty v měřicím řetězci je uveden zde:

#### Referenční termočlánek

Pro měřicí řetězec byl použit termočlánek typu N

#### Převodník teploty

Pro převod teplotního signálu z termočlátku referenčního teploměru na napěťovou úroveň byl použit převodník Omega TX\_DIN1620. Pro měření byl nastaven teplotní rozsah -50 °C až 1250 °C. Vstupem do analogové měřicí karty byl signál 0 až 10V.

#### Analogové měřicí karty virtuální instrumentace

Pro měřicí aplikaci byly využity analogové měřicí karty výrobce NI instruments NI-9223. Dále bylo využito ethernetové měřicí rozhraní DAQ - 9185.



## Vyhodnocovací aplikace virtuální instrumentace

Pro získání dat z vysokoteplotního optického senzoru byla použita měřicí aplikace vytvořená pomocí softwaru LabVIEW, která umožňovala zaznamenávat data s požadovaným nastaveným teplotním krokem. Požadavkem bylo provést měření při postupném oteplování, nebo ochlazování prostoru, ve kterém byla umístěna vysokoteplotní optická sonda s referenčním termočlánkem. Data z optické sondy byla ukládána za pomoci LabVIEW aplikace v časovém okamžiku, když se teplota v referenčním měřeném prostoru teploty změnila o požadovaný teplotní krok. Poté se spustilo ukládání dat po dobu definovaného časového intervalu o délce 1s. Vzorkovací frekvence signálu byla u vstupní karty zvolena na hodnotu 30 030 Hz.

### 6.3 Parametry vstupního optického signálu

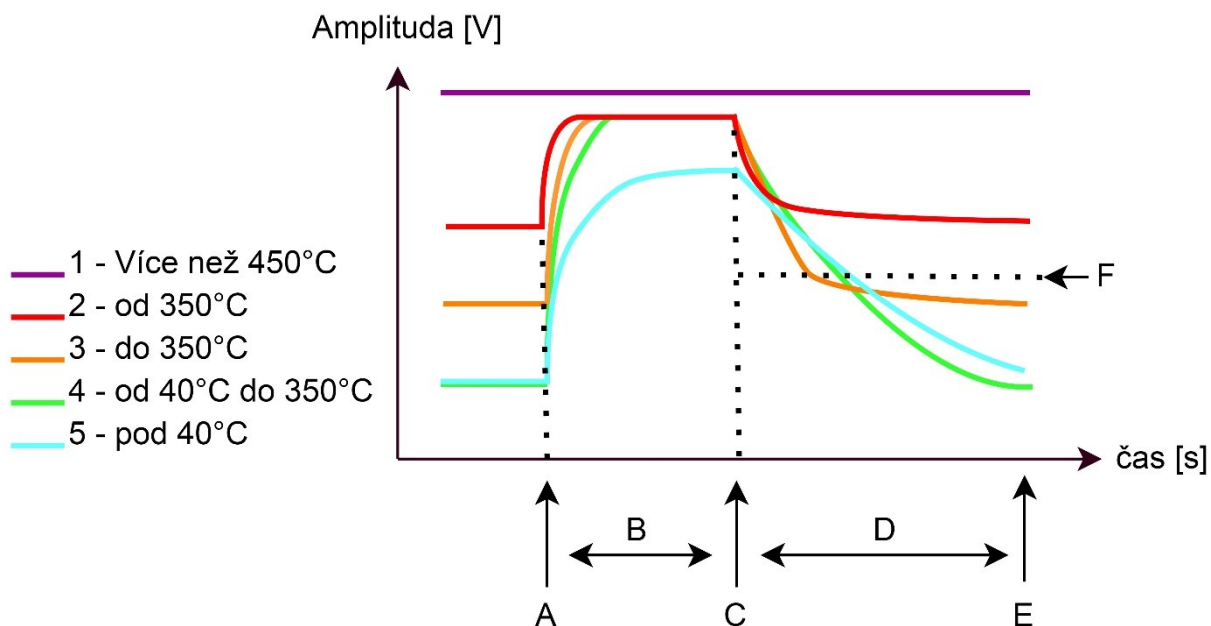
Uvedený měřicí řetězec s optickou vysokoteplotní sondou poskytoval při měření teplot do 1200 °C za využití principu metody záření černého tělesa teplotně závislý signál v maximálním rozmezí amplitudy 2,2V až 2,5V. To záleželo podle verze sondy a elektroniky. Většina měření využitých v této práci však využívala měření pouze pro teploty do 850 °C. Jelikož hlavním problémem řešeným v této práci bylo nalezení kombinace vyhodnocovacích metod. Důležité rozhraní pro kombinaci teplot se uplatňuje v nižším teplotním rozsahu 300 °C až 400 °C.

Pro oblast nízkých teplot přibližně do 300 °C, ve kterých lze užít luminiscenční metodiku měření se jedná o signál obdélníkového tvaru. Tvar náběžné a sestupné hrany tohoto signálu je teplotně závislý. Tato závislost je předmětem analýzy vyhodnocovacích metod převodu měřeného signálu na teplotu.

Perioda obdélníkového signálu byla zvolena na hodnotu 4 Hz. Tato hodnota byla zvolena s ohledem na dobu trvání náběžné a sestupné hrany luminiscenčního signálu. Použití vyšší frekvence lze zvolit, ale s ohledem na možnost snímání ustálené hodnoty luminiscenčního signálu v době po vypnutí budící led diody. Pro výpočet teploty pomocí luminiscenční metody je potřeba zjistit přesnou hodnotu maximálního luminiscenčního signálu. Amplituda tohoto luminiscenčního signálu se pohybovala do úrovně 1,6V.

Měření ustálené hodnoty v době po sestupné hraně luminiscenčního signálu vypovídá o signálu, který lze využít pro určení teploty na základě principů záření černého tělesa.

Následující Obr. 11 ukazuje porovnání amplitud a tvarů signálů pro nízké, střední a vysoké teploty. Popis významů jednotlivých částí problematiky signálu pro užití v měření širokého teplotního rozsahu pomocí kombinace optických metod uvádí další text pod obrázkem.



Obr. 11 Popis tvaru signálu luminiscenčního měření

A - Časový okamžik zapnutí budící fotodiody pro aktivaci luminiscence v krystalu.

B - Oblast, ve které je možno měřit amplitudu signálu pomocí luminiscenční metody.

C - Časový okamžik vypnutí budící fotodiody pro deaktivaci luminiscence v krystalu.

D - Časová oblast pro měření doby strmosti poklesu luminiscenčního signálu.

E - Oblast zastavení poklesu luminiscenčního signálu.

F - Stanovaná hodnota napětí pro měření doby poklesu luminiscenčního signálu.

1 - Křivka velmi vysokých teplot v oblasti od 450 °C, luminiscenční měření není možné využít, protože křivka obsahuje pouze úroveň signálu z principů záření černého tělesa a neumožňují detekci luminiscenčního signálu, která se nachází pod touto úrovní signálu.

2 - Křivka pro oblast vysokých teplot od 350 °C, signál luminiscence je detekovatelný, avšak při poklesu luminiscence křivka neprotíná zvolenou úroveň amplitudy (úroveň F) za účelem měření času doby poklesu luminiscence.

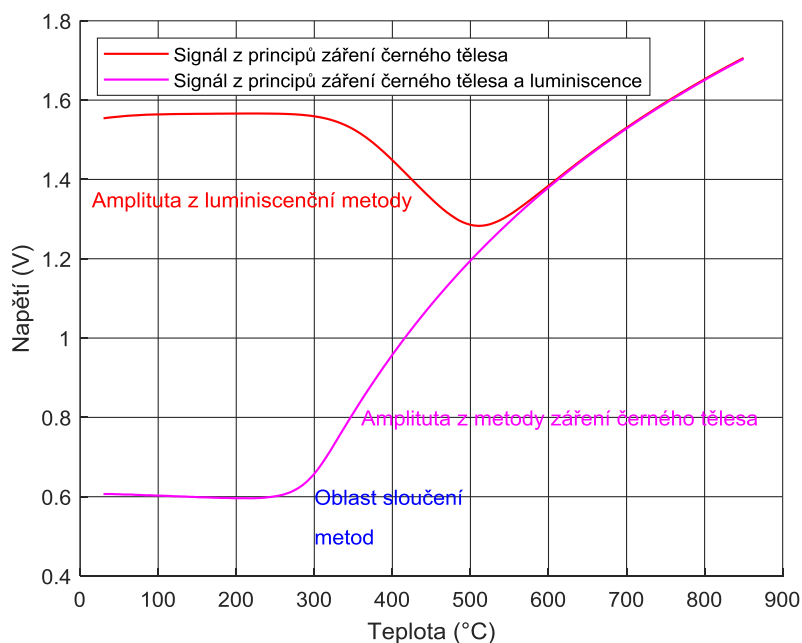
3 - Křivka teplotní oblasti do 350 °C, je limitní pro použití časové luminiscenční metody.

4 - Křivka nízkých teplot pro teplotní oblasti od 40 °C do 350 °C umožňující využití pomocí časového luminiscenčního měření.

5 - Křivka pro teploty pod 40 °C, luminiscenční signál dosahuje výrazně nižší hodnoty amplitudy, strmost křivky se v závislosti na teplotě příliš nemění.

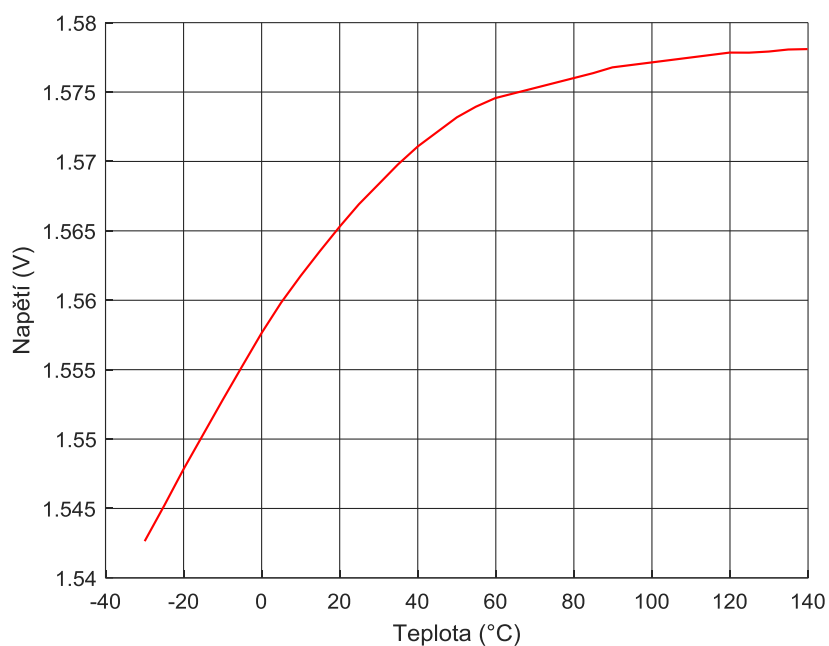
V předchozím Obr. 11 je znázorněno porovnání teplotní závislosti parametrů a tvaru vstupního signálu z optického senzoru pro účel měření teplot v širokém teplotním rozsahu. Následující graf Obr. 12

ukazuje teplotně závislé průběhy maximálních a minimálních amplitud vstupního optického signálu generovaných za pomoci záření černého tělesa a luminiscence krystalu. V levé části obrázku je názorná nízká amplitudová luminiscenční teplotní závislost pro pásmo při užití nízkých teplot. Z důvodu nízké amplitudové teplotní závislosti, je pro teplotní oblast  $-30^{\circ}\text{C}$  až  $140^{\circ}\text{C}$  uveden graf z požadovaným měřítkem na Obr. 14. Dále je patrné, že maximální amplituda pro teplotní rozsah od  $140^{\circ}\text{C}$  do přibližně  $250^{\circ}\text{C}$  vykazuje teplotní závislost nevhodnou pro měření teploty. Signál generovaný principem záření černého tělesa pro tuto teplotní oblast vykazuje také amplitudovou teplotní závislost nevhodnou pro měření teploty. Jedná se tedy o teplotní oblast umožňující pouze časový luminiscenční princip měření. Časová teplotní závislost dosvitu luminiscence při různém poklesu napětí ukazuje graf na Obr. 14. Od teplot  $300$  až  $450^{\circ}\text{C}$  je patrný vliv teplotní závislosti poklesu amplitudy signálu luminiscence v závislosti na stoupající teplotě. V teplotní oblasti okolo  $500^{\circ}\text{C}$  začíná převažovat vliv složky signálu z principu záření černého tělesa. Dostupný signál vykazuje tedy předpoklady pro možnosti kombinace metod zpracování dat opticky teplotně závislého signálu za účelem měření teplot v širokém teplotním rozsahu.

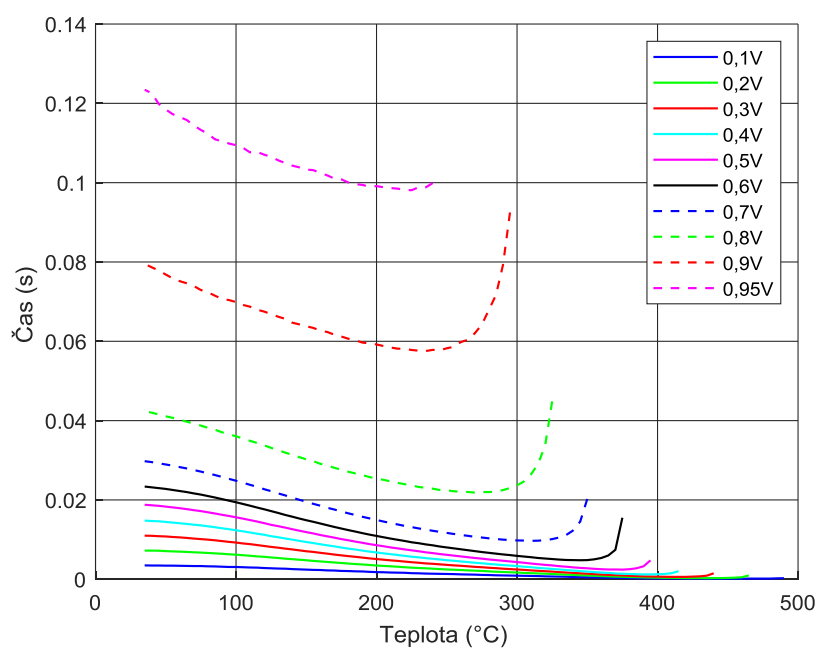


Obr. 12 Průběhy teplotních závislostí amplitud  $30^{\circ}\text{C}$  až  $850^{\circ}\text{C}$

Graf na Obr. 13 ukazuje amplitudovou teplotní závislost luminiscenčního signálu pro teplotní oblasti nízkých teplot. Princip této vyhodnocení metodiky je vhodný pro teploty nižší než  $30^{\circ}\text{C}$ , ve které se vyskytuje teplotní strmost signálu  $0,5\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ . Tento princip teplotní závislosti je možné za účelem měření nízkých teplot využít. Je však potřebné znát maximální amplitudu luminiscenčního signálu pro definovanou teplotu.



Obr. 13 Průběh závislosti amplitudy pro teplotu -30 °C až 140 °C



Obr. 14 Časová teplotní závislost dosvitu luminiscence při různém poklesu napětí

Graf na Obr. 14 ukazuje vliv měření poklesu doby luminiscenčního signálu pro různé definované hodnoty velikosti poklesu napětí. Z grafu je patrné, že při měření se stanoveným poklesem o vyšší hodnotu napětí luminiscenčního signálu pak klesá použitelnost této časové metodiky při využití pro vyšší měřené teploty. V případě, že je stanovený limit pro měření času na vyšší hodnotě, tak dochází k situacím, ve kterých je luminiscenční signál ovlivňován signálem generovaným principem záření černého tělesa. Tato situace je na křivce patrná v místě ohybu křivky pro vyšší teploty. V této

situaci dochází k měření neplatných časových hodnot doby poklesu luminiscenčního signálu. Výhoda využití vyššího poklesu umožňuje vyšší citlivost při převodu časového signálu na měřenou teplotu, avšak při volbě vyššího poklesu je možné využívat luminiscenční časové měření pro nižší teploty. Stanovení vhodného limitu pro měření poklesu signálu musí být vhodným kompromisem. Shrnutí parametrů vstupního teplotně závislého optického signálu jsou uvedeny v následující tabulce:

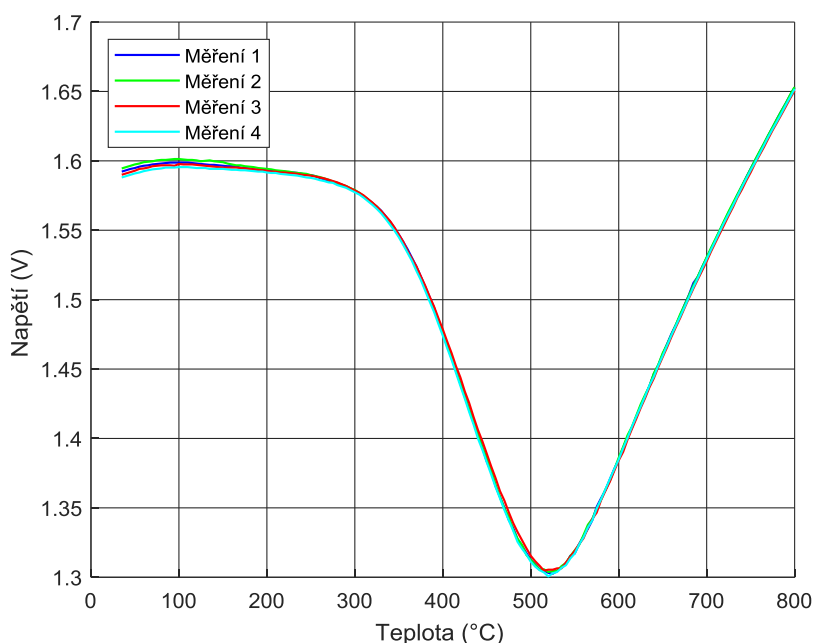
*Tabulka 1 Popis parametrů časového luminiscenčního signálu*

<b>Teplotní oblast pro možnosti využití luminiscenčního principu</b>	<b>Hodnota</b>	<b>Jednotka</b>
Perioda signálu	4	Hz
Luminiscenční maximální amplituda pro rozmezí 50 až 350°C.	1,3 - 1,55	V
Doba poklesu luminiscence o 0,1 V při teplotě v mezích 50 až 350°C.	3,4 - 0,5	ms
Doba poklesu luminiscence o 0,2 V při teplotě v mezích 50 až 350°C.	7,1 až 1	ms
Doba poklesu luminiscence o 0,3 V při teplotě v mezích 50 až 350°C.	10,8 - 1,4	ms
Doba poklesu luminiscence o 0,4 V při teplotě v mezích 50 až 350°C.	14,25 - 2	ms
Doba poklesu luminiscence o 0,5 V při teplotě v mezích 50 až 350°C.	18,5 - 2,8	ms
Doba poklesu luminiscence o 0,6 V při teplotě v mezích 50 až 330°C.	22,9 - 0,5	ms
Doba poklesu luminiscence o 0,7 V při teplotě v mezích 50 až 300°C.	28,9 - 9,7	ms
Doba poklesu luminiscence o 0,8 V při teplotě v mezích 50 až 260°C.	41 - 22	ms
Doba poklesu luminiscence o 0,9 V při teplotě v mezích 50 až 230°C.	76,8- 57,7	ms
Doba poklesu luminiscence o 0,9 V při teplotě v mezích 50 až 190°C.	118,5 - 99,4	ms
Teplotní amplitudová závislost pro -30 až 60 °C	1,54 - 1,575	V
Teplotní amplitudová závislost pro 320 až 500°C	1,55 - 1,28	V
<b>Teplotní oblast pro možnost využití principu záření černého tělesa</b>	<b>Hodnota</b>	<b>Jednotka</b>
Měřitelná amplituda od 300 do 850 °C	0,657 - 1,7	V

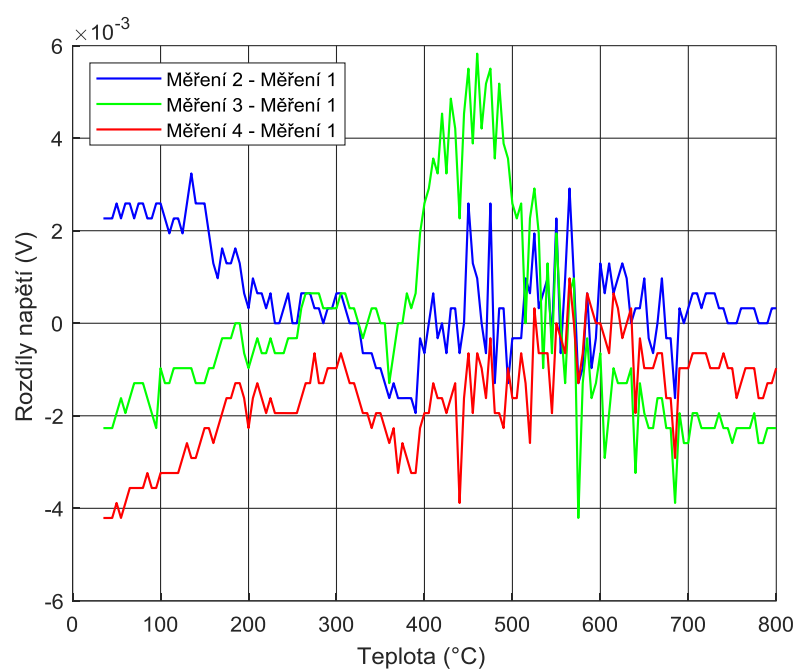
Předchozí Tabulka 1 uvádí základní parametry dostupného signálu. Přesné konkrétní parametry byly závislé na dané použité sondě v testovacím měřicím řetězci. Z výše uvedených grafů na Obr. 12, Obr. 13 a Obr. 14 je patné, že vstupní signál z optického širokopásmového teplotního senzoru poskytuje teplotní závislost pro všechny teplotní oblasti, avšak není možné vyhodnocovat teplotu pouze jednou metodou. Pro pokrytí širokého teplotního rozsahu je potřebné využít spojení kombinací vyhodnocovacích metod.

## 6.4 Porovnání opakovatelnosti amplitudových a časových parametrů vstupního signálu

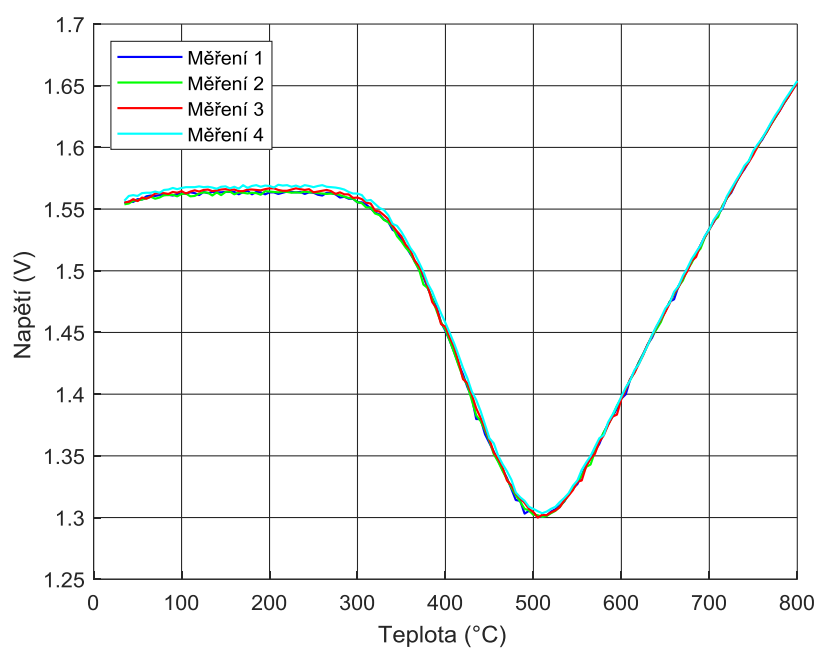
Z důvodu ověření principu teplotní luminiscenční amplitudové a časové závislosti vstupního analyzovaného optického signálu z jednotlivých optických teplotně závislých sond bylo provedeno opakované porovnávací měření. Jednalo se o opakovaná měření, která potvrdila teplotní stálost maximálního amplitudového signálu při opakovaných teplotních měřeních. Účelem bylo také porovnat teplotně závislé amplitudy signálů jednotlivých sond. V grafech jsou porovnávány maximální amplitudy pro čtyři opakovaná měření jednotlivých sond. Grafy na Obr. 15, Obr. 17, Obr. 19 ukazují opakované průběhy měření pro jednotlivé optické teplotní sondy. Dále grafy Obr. 16, Obr. 18, Obr. 20 ukazují porovnání teplotní závislosti vstupních amplitud mezi jednotlivými měřeními. Grafy ukazují rozdíly maximálních amplitud mezi prvním měřením a dalšími třemi měřeními. Porovnávané signály jsou generovány teplotní závislostí luminiscence a principem záření černého tělesa. Jedná se o maxima amplitud signálu generované těmito dvěma metodami. Přibližně od teploty 530 °C se jedná o signál generovaný výhradně za pomoci principů záření černého tělesa. Při porovnání jednotlivých teplotně závislých měřených signálů bylo naměřeno mezi jednotlivými signály pro teploty 30 °C až 800 °C těchto odchylek: Pro sondu 1 do 10 mV, sonda 2 do 20 mV, sonda 3 do 10 mV. Tyto odchylky teplotně závislého amplitudového signálu mezi jednotlivými měřeními je třeba zohlednit při výběru univerzální vyhodnocovací metodiky při přepočtu na měřenou teplotu. Opakované měření však ověřilo teplotní závislost průběhu maximální amplitudy vstupního optického signálu, kterou lze využít pro návrh vyhodnocovacích metod.



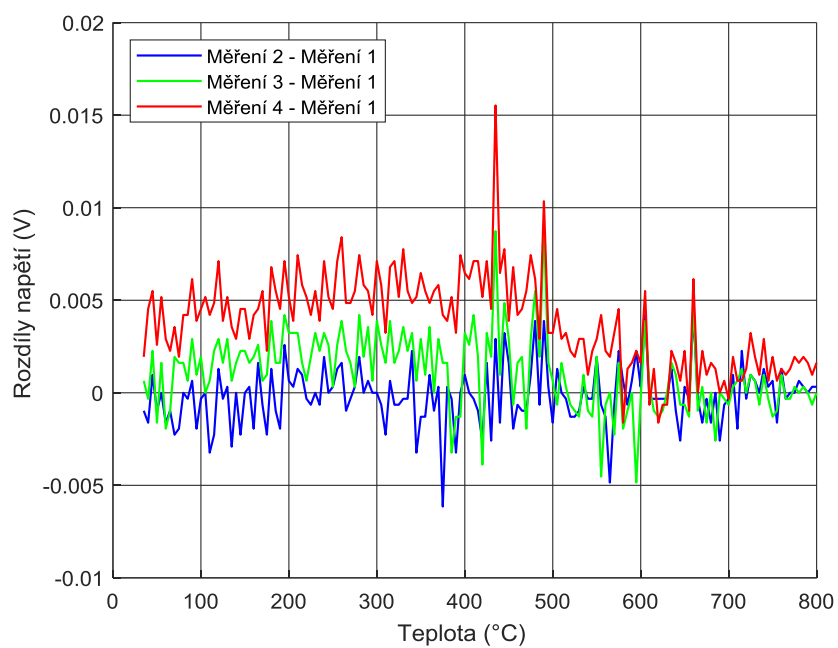
Obr. 15 Porovnání maximálních amplitud z dostupných měření pro sondu 1



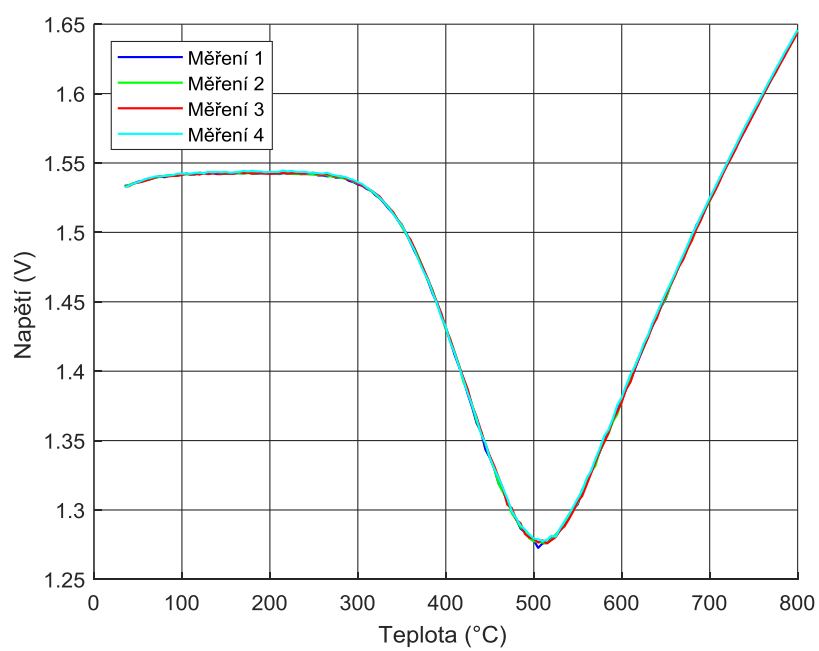
Obr. 16 Porovnání rozdílů maximálních amplitud z dostupných měření pro sondu 1



Obr. 17 Porovnání maximálních amplitud z dostupných měření pro sondu 2

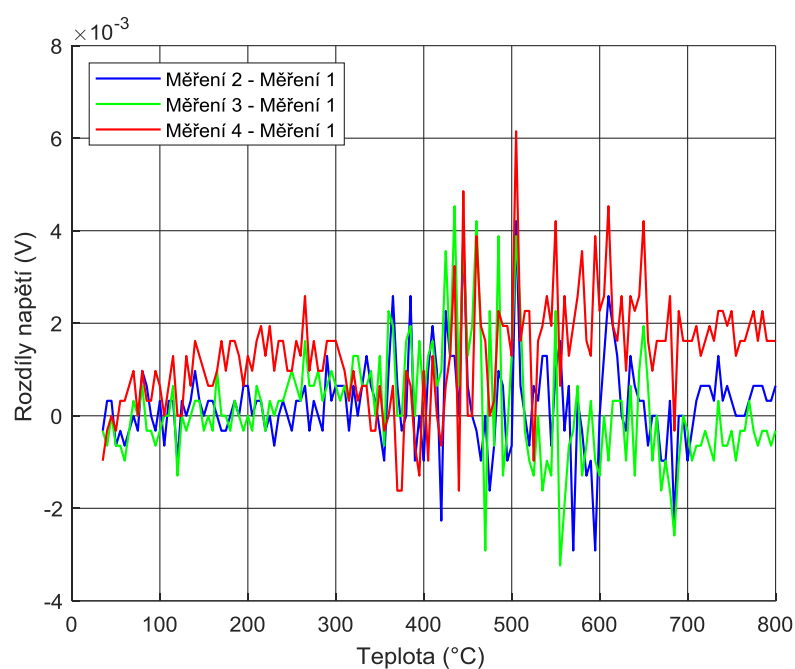


Obr. 18 Porovnání rozdílů maximálních amplitud z dostupných měření pro sondu 2



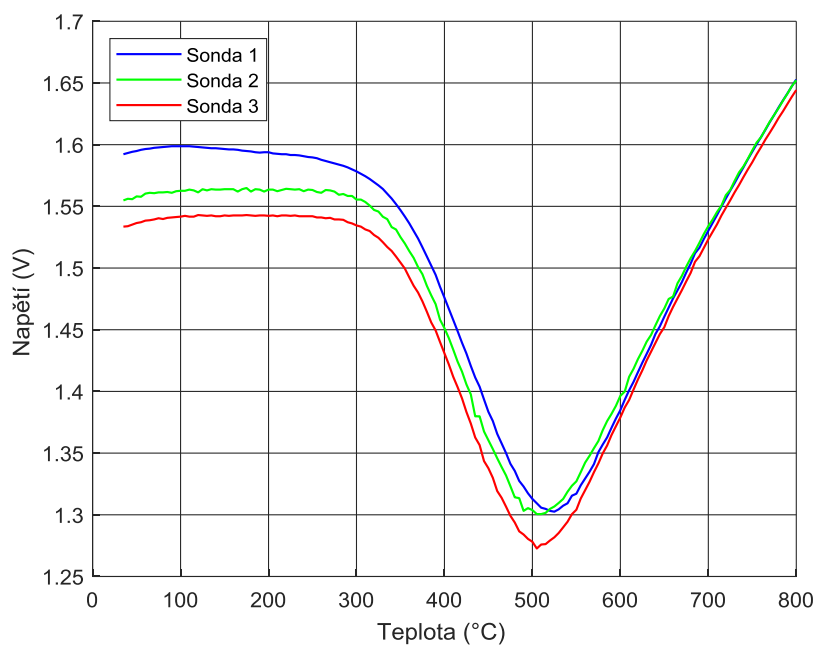
Obr. 19 Porovnání maximálních amplitud z dostupných měření pro sondu 3





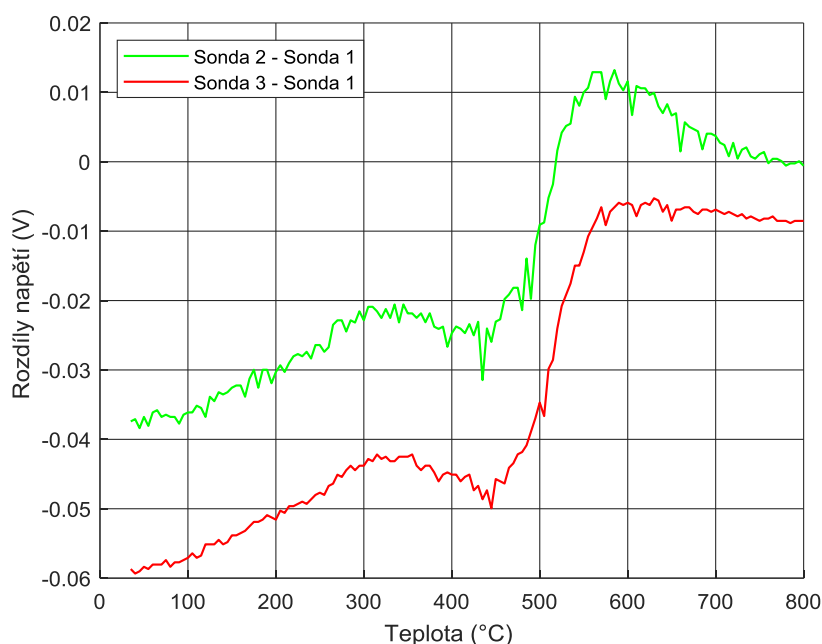
*Obr. 20 Porovnání rozdílů maximálních amplitud z dostupných měření pro sondu 3*

Dalším krokem bylo provedení porovnání vstupních amplitud mezi jednotlivými sondami. Výsledky porovnání ukazují grafy na Obr. 21. Tento graf ukazuje maximální amplitudy teplotně závislého signálu pro měřený rozsah 30 až 800 °C. Na grafu uvedeném na Obr. 22 je znázorněn rozdíl amplitudového signálu při totožných teplotách mezi signály ze sondy 1-2 a 1-3. Jednotlivé sondy dosahují odchylek amplitud signálu především v luminiscenční oblasti do teplot 500 °C.



*Obr. 21 Porovnání maximálních amplitud optického signálu mezi jednotlivými sondami*

V teplotní oblasti nad teploty 550 °C se uplatňují pouze principy záření černého tělesa a rozdíly amplitud signálu v těchto vyšších teplotách mezi jednotlivými sondami klesají.



*Obr. 22 Porovnání rozdílů amplitud mezi sondami*

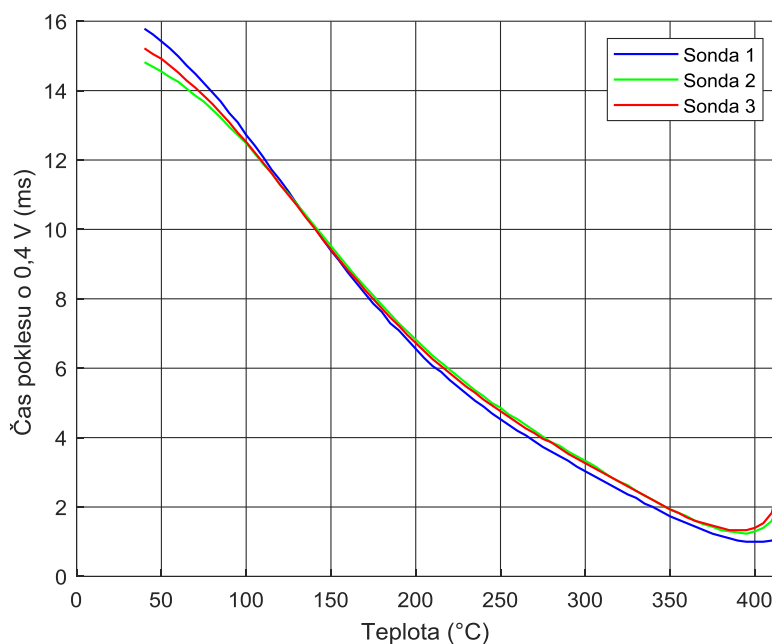
Z těchto zjištěných informací o luminiscenční amplitudové závislosti a stálosti signálu při jednotlivých měřeních je patrné, že amplituda teplotní závislosti luminiscenčního signálu se vyznačuje pro jednotlivé sondy výrazným amplitudovým rozdílem. Nelze tedy uvažovat o využití amplitudového luminiscenčního principu měření teplot bez provedení kalibrace. Z výsledků těchto výše uvedených porovnání je však patrné, že jednotlivé sondy dosahují relativně podobných amplitudových parametrů a uvažované principy optických teplotně závislých metod vyhodnocení teploty lze využít.

Z důvodu ověření použitelnosti časové metody bylo provedeno porovnání vyhodnocení strmosti křivek z tří dostupných teplotních sond. Pro ověření přesnosti byly vybrány limity pro měření doby trvání poklesu času o hodnoty napětí vůči maximální hodnotě luminiscence o 0,1 V a 0,4 V. Hodnota poklesu 0,1 V byla zvolena jako nejnižší vhodná hodnota pro měření času a umožňuje využít luminiscenční teplotní časovou závislost až do teplot 400 °C. Naopak zvolená hodnota poklesu 0,4 V byla zvolena jako nejvyšší hodnota poklesu amplitudy, která umožňuje měřená teplot pomocí časové luminiscenční metody až do teplot 360 °C. Měření s využitím poklesu o vyšší úroveň amplitudy než 0,4 V není uvažováno. Jelikož by nebylo možné využít časové luminiscenční metodu pro vyšší teploty, ve které by mohla být ovlivňována amplitudou záření černého tělesa. Křivky popisující časovou teplotní závislost doby trvání poklesu luminiscence jsou uvedeny v předchozí podkapitole na Obr. 14.

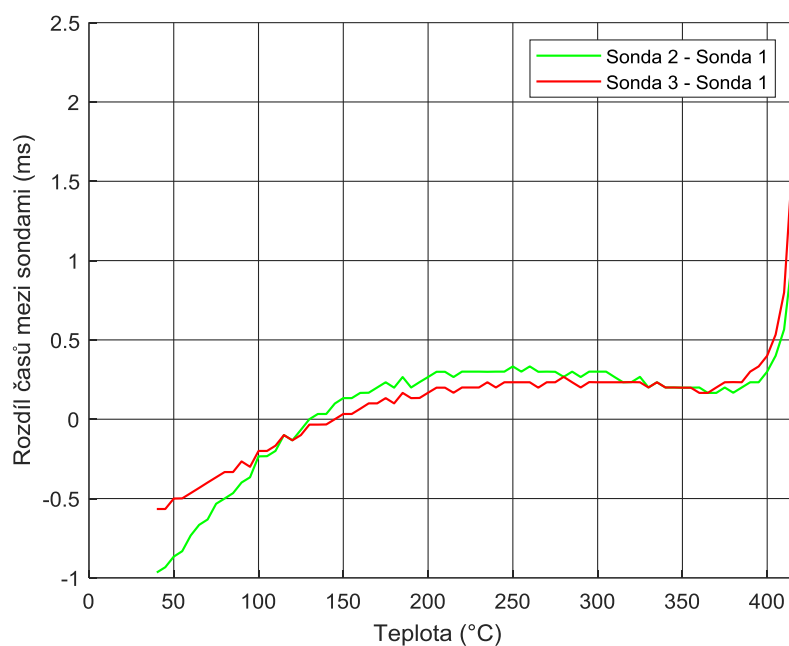
Měřené výsledky teplotní závislosti jsou uvedeny v grafech na Obr. 23 a Obr. 25. Bylo také provedeno porovnání naměřených dat, mezi sondami 1 - 2 a 1 - 3. Výsledky časové luminiscenční závislosti pro jednotlivé sondy jsou uvedeny v grafech na Obr. 24 a Obr. 26. Porovnání rozdílu mezi sondami je uvedeno na Obr. 24 a Obr. 26. Z výsledků lze usoudit, že správně vybraná úroveň poklesu amplitudy

má největší význam především na rozdíl změřené doby poklesu signálu mezi sondami v teplotních oblastech do 100 °C. Při porovnání výsledku z jednotlivých sond je patrné, že sondy 2 a 3 dosahují mezi sebou menších odchylek. Rozdíly v měření vůči sondě 1 pro případ poklesu 0,4 V a 0,1 V jsou uvedeny na obrázku grafu Obr. 24 a Obr. 26.

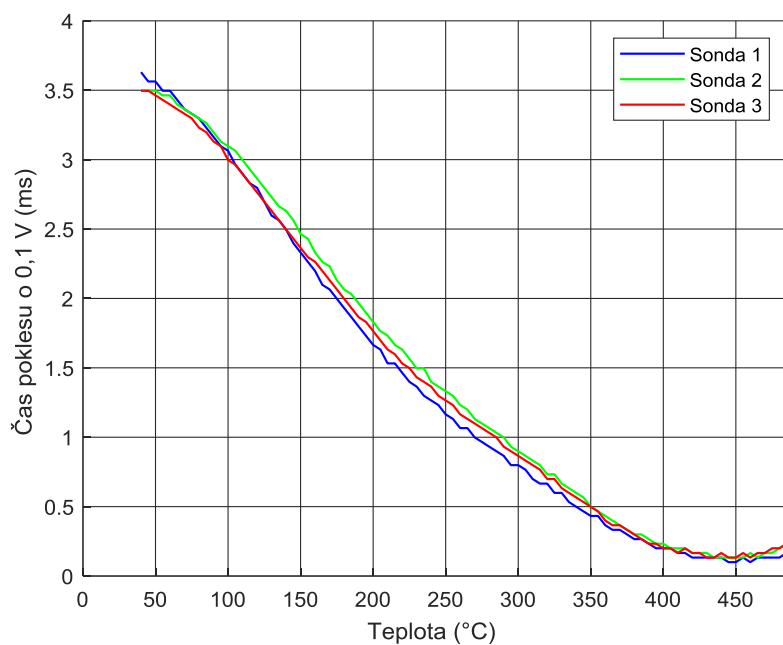
Porovnání doby poklesu amplitudy luminiscenčního signálu o stanovenou mez mezi jednotlivými sondami potvrdilo použitelnost této časové vyhodnocovací metody pro vyhodnocení teploty. Limity této metody se nacházejí v teplotní oblasti pod 100 °C a v oblasti nad 350 °C pro zvolený pokles 0,4 V a 400 °C pro vybraný pokles 0,1 V.



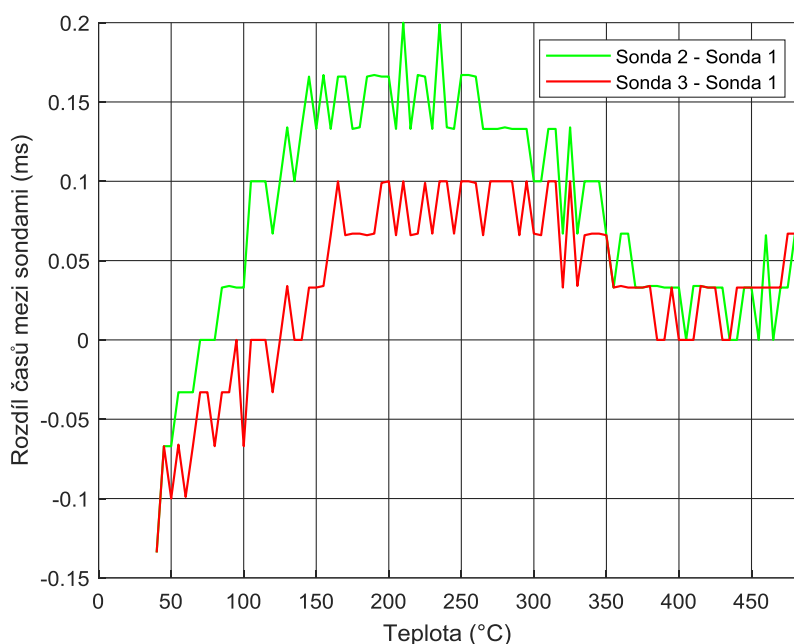
Obr. 23 Porovnání doby poklesu amplitudy luminiscence o 0,4V pro jednotlivé sondy



Obr. 24 Porovnání doby poklesu amplitudy luminiscence o 0,4V mezi jednotlivými měřicími sondami

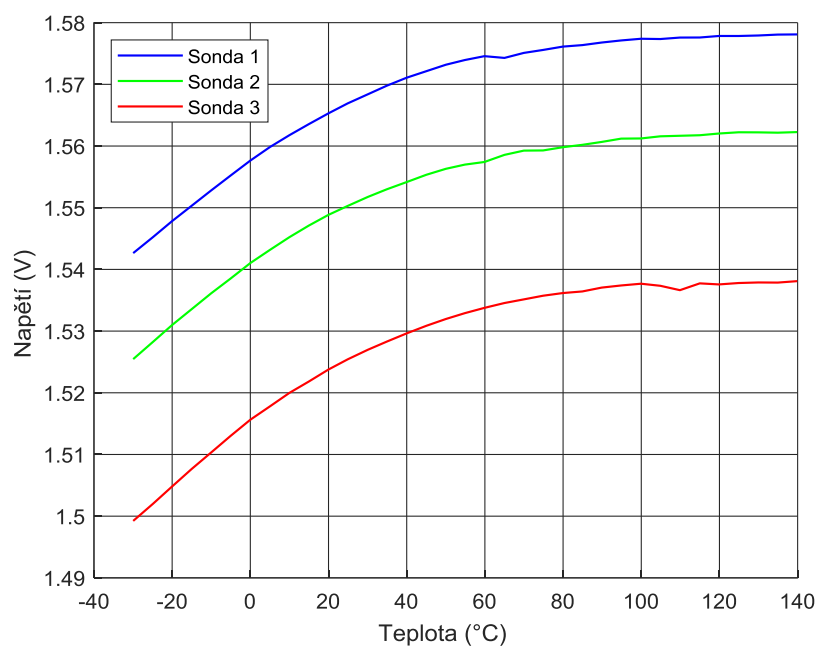


Obr. 25 Porovnání doby poklesu amplitudy luminiscence o 0,1V pro jednotlivé sondy

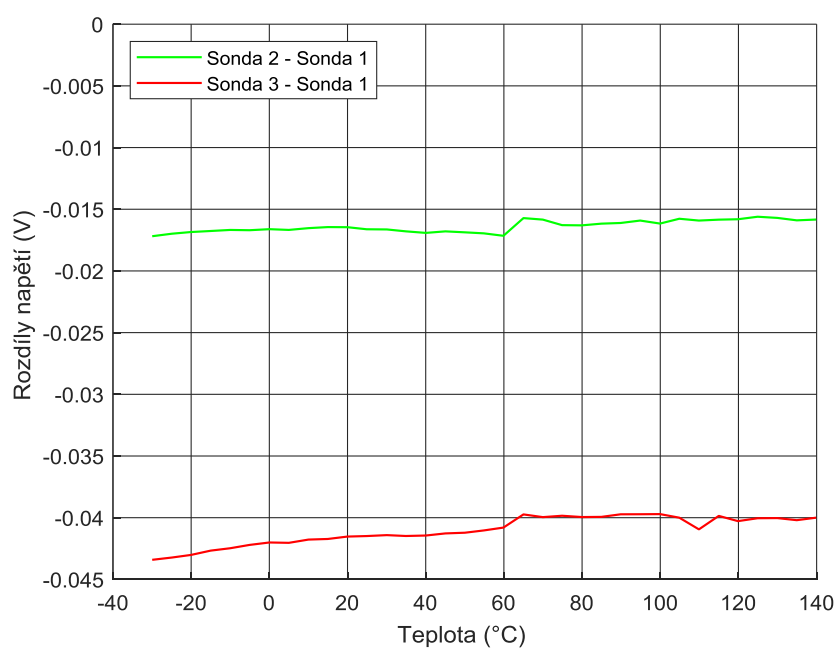


*Obr. 26 Porovnání doby poklesu amplitudy luminiscence o 0,1V mezi jednotlivými měřicími sondami*

Třetí částí pojednává o porovnání luminiscenčních amplitud pro oblast nízkých a záporných teplot. Výsledky amplitudové teplotní závislosti jsou uvedeny na grafu v Obr. 27. Z výsledků je patrné, že všechny tři křivky z jednotlivých optických teplotních sond dosahují teplotně závislé amplitudové závislosti. Rozdíly mezi maximálními luminiscenčními amplitudami jsou málo významné. Rozdíly jsou uvedeny na Obr. 28. Ukazující rozdíly mezi sondami 1 - 2 a 1 - 3. S touto metodikou amplitudovou metodikou vyhodnocení teplot pro nízké a záporné teploty je možné uvažovat. Každá sonda musí být však amplitudově kalibrována při známé teplotě. Je potřeba tuto kalibraci zahrnout do vyhodnocovacího algoritmu. S grafu je patrné, že je možné tuto metodiku vyhodnocení teplot využívat pro nižší teploty než 60 °C. Odpovídající strmosti křivky je pro teplotní rozsah -30 °C až 60 °C 0,34mV/°C.



Obr. 27 Porovnání teplotní závislosti luminiscenčních amplitud sond 1, 2, 3 pro nízké a záporné teploty



Obr. 28 Porovnání rozdílů amplitud mezi sondami

## 7 Návrh metodiky pro zpracování optických signálů z širokého měřicího teplotního rozsahu

Tato kapitola se věnuje vlastní problematice návrhu vyhodnocovací metodiky a zpracování teplotně závislého optického signálu reprezentující teplotu, kterou je potřeba přepočítat na jednotky °C. Analýza dat vstupního signálu v této kapitole ukazuje na důležitost prověření možných přístupů zpracování dat za pomoci využití luminiscenční metody na bázi využití přepočtu maximálních amplitud, časového měření a vyhodnocení teplot pomocí principu záření tělesa.

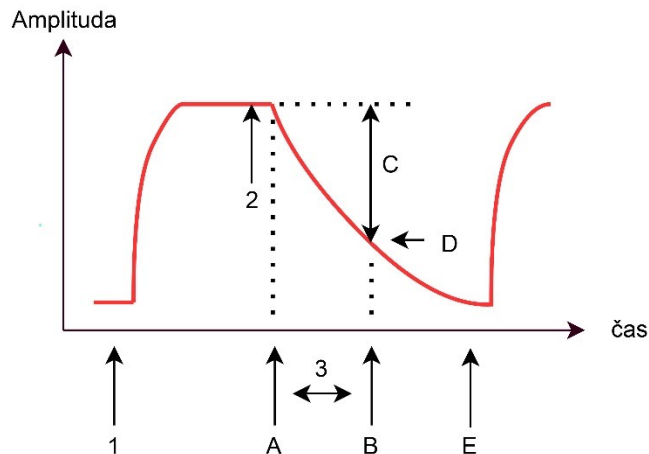
Při stanovení metodiky naměřených dat je potřeba zohlednit nestejnorodost jednotlivých senzorů. Každý takto sestavovaný senzor bude z hlediska optických vlastností jedinečný. Tato problematika je popisována v předchozí kapitole. Není možné zajistit dokonale stejné optické spoje na rozhraní fotodetektor - optické vlákno, rozhraní krystal optické vlákno, rozhraní budící fotodiody optické vlákno. Tyto nepřesnosti ovlivňují hodnotu amplitudy při metodice luminiscenčního měření amplitudy a metodik vyhodnocení za pomoci využití záření černého tělesa.

Pro eliminaci těchto nepřesností je možné využít dynamickou kalibraci měřicího řetězce, za pomoci propojení jednotlivých metod v teplotních oblastech, které to umožňují. Jedná se o využití metod, které stanovují teplotu na základě vyhodnocení časových luminiscenčních metod.

Jednotlivé části této kapitoly obsahují rozbor metodik zpracování signálu daných měřicími metod. Avšak výsledná metodika pro výsledný přepočet získaného zpracovaného optického na údaje o měřené teplotě z širokého teplotního rozsahu je rozebrána až v následujících kapitolách tohoto textu.

### 7.1 Rozbor důležitých měřených parametrů využitelných pro přepočet teploty z optického signálu

Před návrhem vyhodnocovacího algoritmu a přepočtu dat z měřicího cyklu bylo potřeba rozdělit a zohlednit informace, které je možné z vstupního optického teplotně závislého signálu využít za účelem převodu optického signálu na údaj o měřené teplotě. Následující obrázek ukazuje parametry signálů, které jsou klíčové pro sestavení vyhodnocovacího algoritmu. Měřicí vyhodnocovací algoritmus musí pracovat se třemi informacemi, které jsou získány ze vstupního optického signálu. Jedná se o měření maximální a minimální úrovně signálu a doby poklesu luminiscenčního signálu. Níže uvedený Obr. 29. znázorňuje měřené údaje nacházející se v signálu. Podrobný popis znázorněných měřených parametrů signálu a informací je rozebrán pod obrázkem. Perioda opakování tohoto signálu je 250 ms. Proto, aby bylo možné využít dále navrhovanou metodiku vyhodnocovacího algoritmu, tak je potřebná také znalost informace o časovém okamžiku zapnutí a vypnutí budící fotodiody. Tato informace je dostupná z testovacího měřicího řetězce.



*Obr. 29 Grafické znázornění optického signálu a jeho vstupních parametrů pro přepočet teploty pomocí vyhodnocovacího algoritmu*

A - Časový okamžik vypnutí budící fotodiody pro luminiscenci v krystalu.

B - Okamžik zjištění doby poklesu luminiscenčního signálu.

C - Rozdíl napětí mezi maximální hodnotou napětí luminiscence a úrovní signálu pro měření doby poklesu.

D - Rozhodovací úroveň napětí pro měření doby poklesu luminiscenčního signálu.

E - Možný okamžik spuštění algoritmu pro přepočet teplot podle definovaných rovnic.

Přepočet z optického signálu na údaj o měřené teplotě se provádí z těchto tří (1,2,3) číselně označených měřených hodnot v optickém signálu.

1 - Měřené vstupní napětí při neaktivní luminiscenci:

Měřený *parametr 1*. Tato měřená část signálu nese informaci pouze o teplotním měření založeném na principu záření černého tělesa. Jedná se o měření signálu v době bez aktivního budícího signálu, tedy mimo přítomnost luminiscenčního jevu. Jak již uvádí Tabulka 1, tento signál nabývá napěťových hodnot 0,6 až 1,7V pro teplotní rozsah 30 °C až 850 °C. Použitelnost tohoto signálu, pro vyhodnocení pomocí metod principů záření černého tělesa se začíná uplatňovat v teplotní oblasti 280 °C, ve které signál nabývá hodnoty 0,62 V. Jelikož se jedná o signál, který je může být zatížen šumem, je potřeba tento signál vhodně filtrovat. Pro filtraci vstupního optického signálu byl zvolen výpočet mediánu z pole naměřených dat o 100 vzorcích s vzorkovací frekvencí 30 030 Hz. Je možné uplatnit přímý přepočet z tohoto signálu na měřenou hodnotu °C pomocí polynomů.

2 - Měřené vstupní napětí při aktivní luminiscenci:

Měřený *parametr 2*. Zde se jedná se o měření signálu v době aktivního budícího signálu. Tento luminiscenční optický signál má teplotní amplitudovou závislost v případech nízkých a záporných teplot. Tato teplotní závislost je znázorněná na Obr. 13 a na obrázku Obr. 27. Vstupní amplituda signálu pro další zpracování se filtruje pomocí mediánu taktéž z pole naměřených dat o 100 vzorcích.



Přibližně od teplot 500 °C je tento signál přehlčován signálem vznikajícím na bázi využití záření černého tělesa.

### 3 - Měřený čas poklesu luminiscenčního signálu.

Měřený *parametr 3*. Měření doby poklesu luminiscenčního signálu o definovanou napěťovou úroveň (napěťová úroveň je parametr „C“ v Obr. 29). Definice optimálního poklesu je předmětem řešení metodiky vyhodnocení dat.

## 7.2 Definice rovnic pro jednotlivé přepočty vstupního signálu na údaj o měřené teplotě

Pro převod vstupního signálu na údaj o výsledné teplotě bylo potřebné připravit patřičné vyhodnocovací rovnice. Všechny tři využitě vyhodnocovací metody, to jsou luminiscenční amplitudové, časové metody a metody záření černého tělesa využívají pro vyhodnocení při převodu na výslednou teplotu totožný tvar kvadratického polynomu. Koeficienty rovnice jsou uváděny pro jednotlivé ověřovací případy v tabulkách. Z otestovaných přepočtů vyplynulo, že pro přepočet vystačí polynom čtvrtého řádu. V některých případech je tetován polynom nižšího řádu, což je patrné použitím nulových koeficientů, které jsou uvedeny v patřičné tabulce. Tvar a označení jednotlivých koeficientů pro vyhodnocovací polynom je uveden v rovnici (7.1). Každá tabulka uvádí koeficienty daného testovaného přepočtu s uvedením faktoru spolehlivosti rovnice. Hlavičku tabulek, které jsou uváděny v další podkapitolách vzorově uvádí Tabulka 2. V tabulce je uvedeno *n*, které značí verzi koeficientů pro vyhodnocovací rovnici. Pro každou metodu bylo provedeno ověření použití vhodného řádu kvadratického polynomu, který dostatečně vyhovoval pro uváděný teplotní průběh. Jednotlivé tabulky s koeficienty a grafy s výsledky jsou uvedeny v následujících podkapitolách, které popisují problematiku vyhodnocení pomocí jednotlivých metod. Rovnice a koeficienty byly sestaveny na základě měření s referenčním teploměrem využívaným v testovacím měřicím systému.

$$y = ex^4 + dx^3 + cx^2 + bx + a \quad (7.1)$$

Pro uvedenou rovnici platí následující:

*y* - Výsledná teplota.

*x* - Vstupní měřený parametr 1,2 nebo 3.

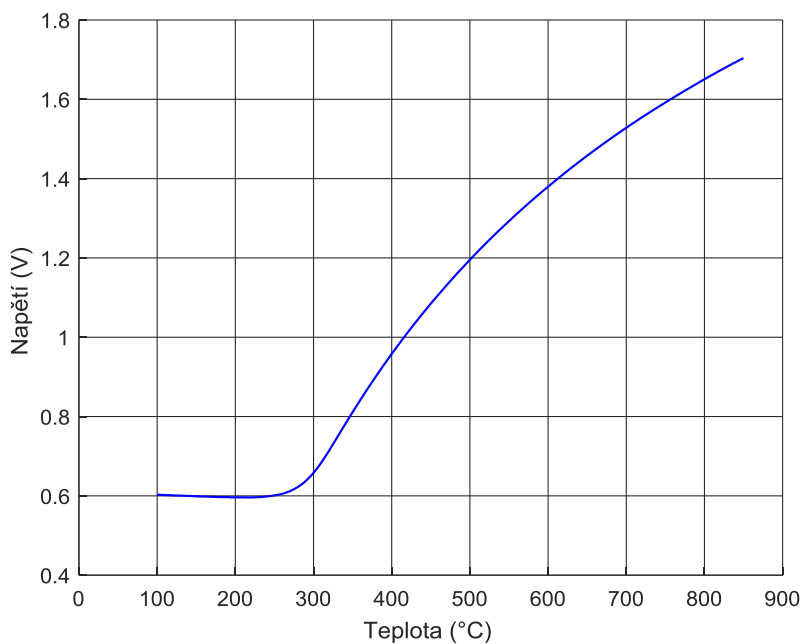
Tabulka 2 Uvedený vzor tabulky pro koeficienty rovnic

Verze koeficientů	Teplotní rozsah	Koeficient					Spolehlivost rovnice
		a	b	c	d	e	
n	-30 °C až 850 °C	0	0	0	0	0	0

### 7.3 Ověření možností algoritmu pro využití přepočtu teplot ze signálu pomocí principu záření černého tělesa

Výpočet teploty pro pomocí metody záření černého tělesa je nejjednodušší částí jednotlivých algoritmů popisovaných v této práci.

Údaj o měřené teplotě je teplotně závislou funkcí amplitudy v měřeném vstupním signálu. V Obr. 29 se jedná se o měřený údaj označený jako parametr 1. Tento parametr v optickém signálu je měřen po odeznění luminiscenčního jevu. Je vstupním údajem, pro vyhodnocovací rovnici. V případě, že by nebyla zaručena možnost měření tohoto signálu mimo luminiscenční signál, nebylo by možné vyhodnotit teploty pomocí této metody pod úroveň teplot 550 °C. Což je teplotní oblast, ve které dochází k přehlcení luminiscenčního signálu, signálem využívající princip záření černého tělesa. V teplotní oblasti nad 550 °C začíná platit, že měřená amplituda *parametr 2* je menší než *parametr 1*. Tento jev je názorný na již dříve uvedeném Obr. 12. V znázorněném grafu reprezentuje měřený *parametr 1* metoda záření černého tělesa křivka fialové barvy a měřený *parametr 2* luminiscenční metoda křivka červené barvy.

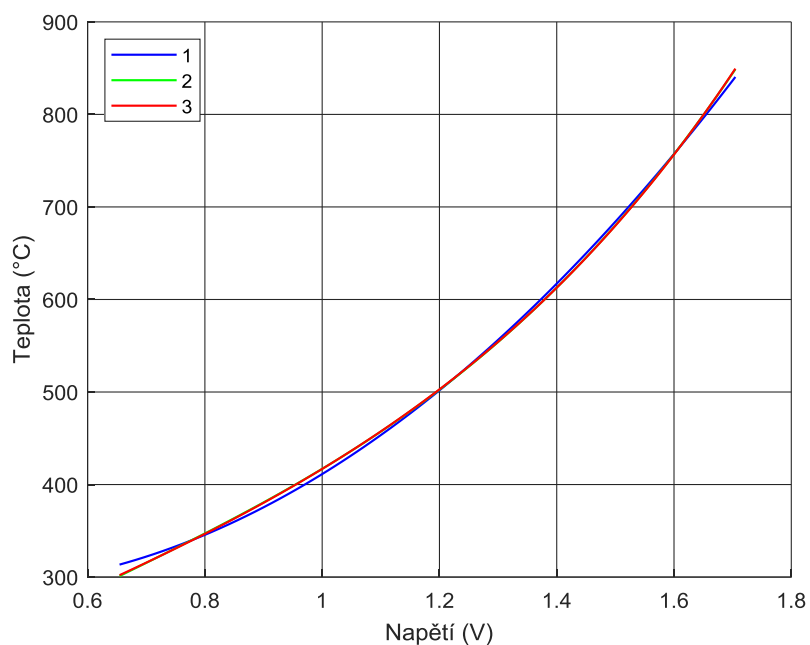


Obr. 30 Průběh teplotní amplitudové závislosti metody záření černého tělesa

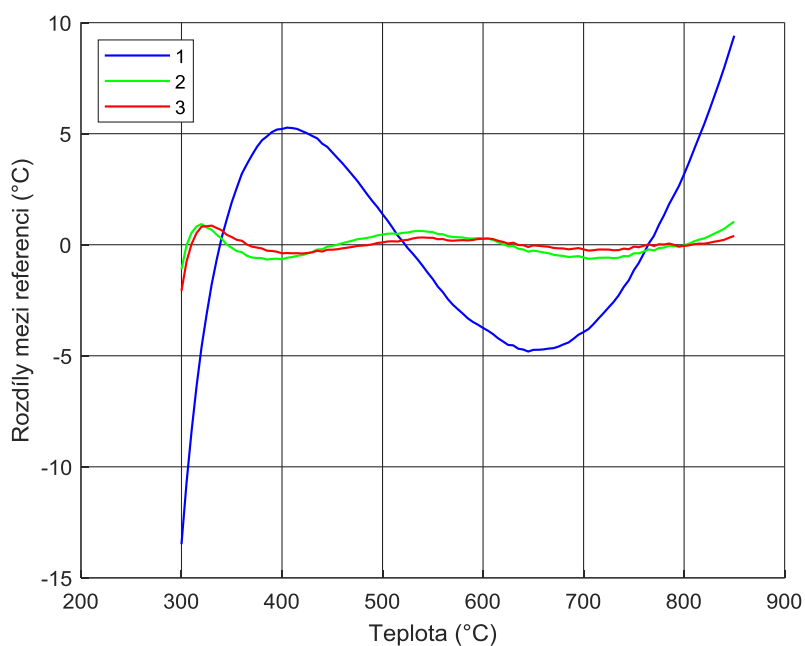
Převod na údaj v jednotkách °C z amplitudy záření černého tělesa na výsledné teplotě je možné provést pomocí rovnice (7.1). Koeficienty rovnice uvádí Tabulka 3. Porovnání výsledků výpočtů přepočtu na měřenou teplotu podle jednotlivých řádů polynomů ukazuje následující graf na obrázku Obr. 31. Porovnání rozdílů mezi výslednou přepočítanou teplotou a referenční teplotou uvádí graf na Obr. 32.

Tabulka 3 Koeficienty testované pro možnost výpočtu pomocí metody záření černého tělesa

Verze koeficientů	Teplotní rozsah	Koeficient					Spolehlivost rovnice
		a	b	c	d	e	
1	300 °C až 850 °C	331,32	-230,38	310,36	0	0	0,9993
2	300 °C až 850 °C	44,32	552,98	-368,76	188,44	0	1
3	300 °C až 850 °C	133,48	224,33	69,706	-63,285	52,643	1



Obr. 31 Výpočet teplot na základě amplitudy dle principu záření černého tělesa podle definované rovnice a jednotlivých koeficientů

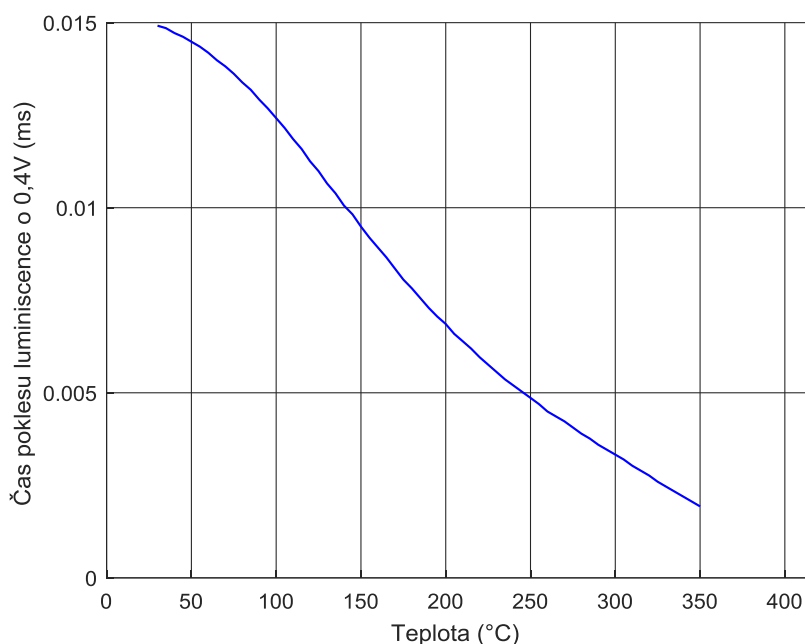


Obr. 32 Porovnání výsledků rovnic pro výpočet pomocí metody záření černého tělesa

Pro realizované řešení je vhodné zvolit metodu s koeficienty 4 řádu. Popisují přepočtení signálu s menší chybou v pracovním rozsahu.

#### 7.4 Ověření možností algoritmu pro využití principu luminiscenční časové metody

Pro teplotní oblasti neumožňující využití metod záření černého tělesa bylo nutno ověřit vyhodnocovací metodiky časových luminiscenčních metod. Na přesnost a použitelnost této vyhodnocovací časové metody má vliv správné nastavení rozhodovací úrovně napětí určující bod pro měření doby poklesu amplitudy luminiscenčního signálu. Časová teplotní luminiscenční závislost je znázorněna grafu uvedeném na Obr. 14. Pro prvotní sestavení vyhodnocovací rovnice byla vybrána vstupní časová data, která popisují teplotní závislost doby trvání dohasínání luminiscence o pokles 0,4V vůči plnému luminiscenčnímu signálu. Jedná se o *parametr C*, který je uvedený na grafickém znázornění na Obr. 29. Měřená doba poklesu luminiscenčního signálu je na totožném obrázku označena jako *parametr 3*.



*Obr. 33 Časová teplotní závislost doby poklesu luminiscenčního signálu o úroveň 0,4 V*

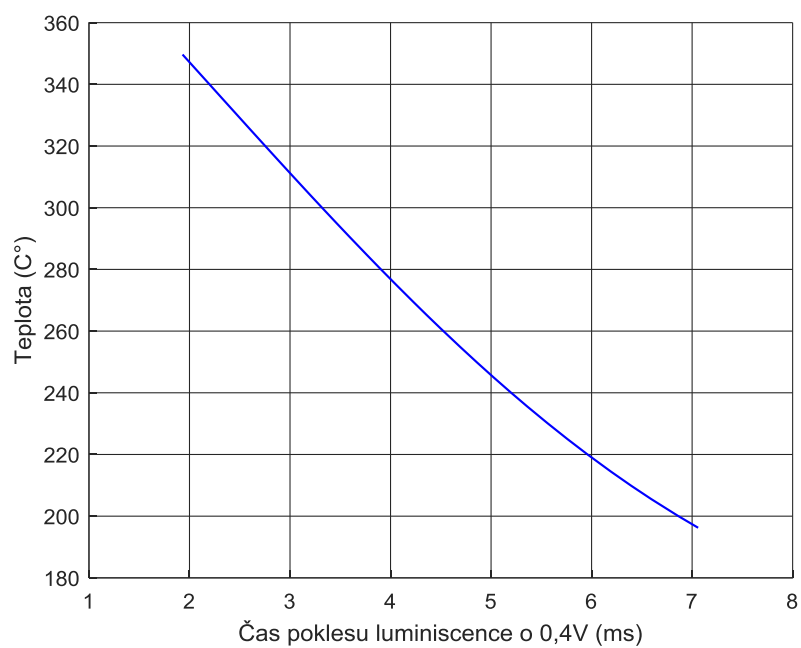
Na obrázku Obr. 33 je znázorněna časová teplotní závislost měření doby poklesu luminiscenčního signálu o úroveň 0,4 V. Z grafu je patrné, že křivka se láme v teplotní oblasti 200 °C a v teplotní oblasti 70 °C.

Z důvodu přesnosti a jednoduchosti rovnic, je vhodné tyto oblasti rozdělit a sestavit pro tyto úseky vyhodnocovací rovnice s různými koeficienty pro různé teplotní oblasti. Koeficienty uvádí následující Tabulka 4. Vstupním údajem pro výpočet je čas doby poklesu luminiscence. Jedná se o měřený parametr 3, informace jsou uvedeny na Obr. 29.

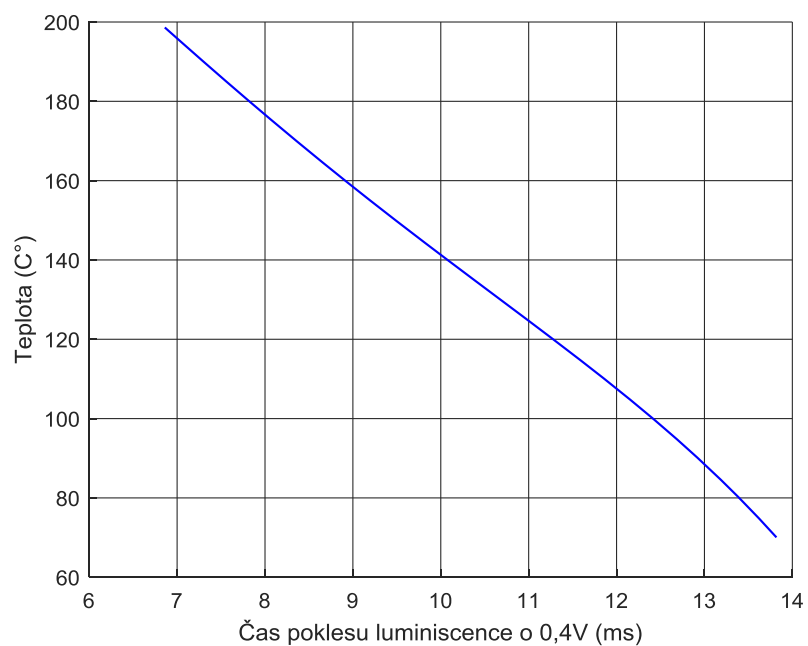
*Tabulka 4 Koeficienty pro rovnici přepočtu využívající princip časové luminiscenční metody*

Verze koeficientů	Teplotní rozsah	Koeficient					Spolehlivost rovnice
		a	b	c	d	e	
1	200 °C až 350 °C	414,71	-29,504	- 3,1879	0,5709	-0,021	0,999
2	70 °C až 200 °C	256,45	22,438	-8,3254	0,699	-0,0206	0,999
3	30 °C až 70 °C	10005	-2176,3	160,66	-3,9951	0	0,999

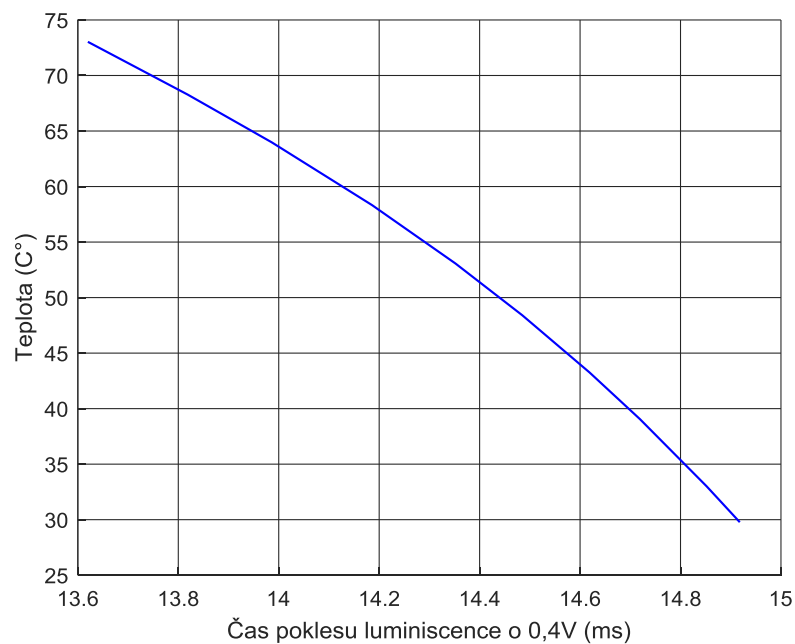
Přepočty časů na měřenou teplotu pro jednotlivé úseky uvádí následující grafy na Obr. 34, Obr. 35 a Obr. 36. Porovnání rozdílu mezi vypočtenou teplotou za pomoci časového měření a referenční teplotu je uveden na grafu na obrázku Obr. 37.



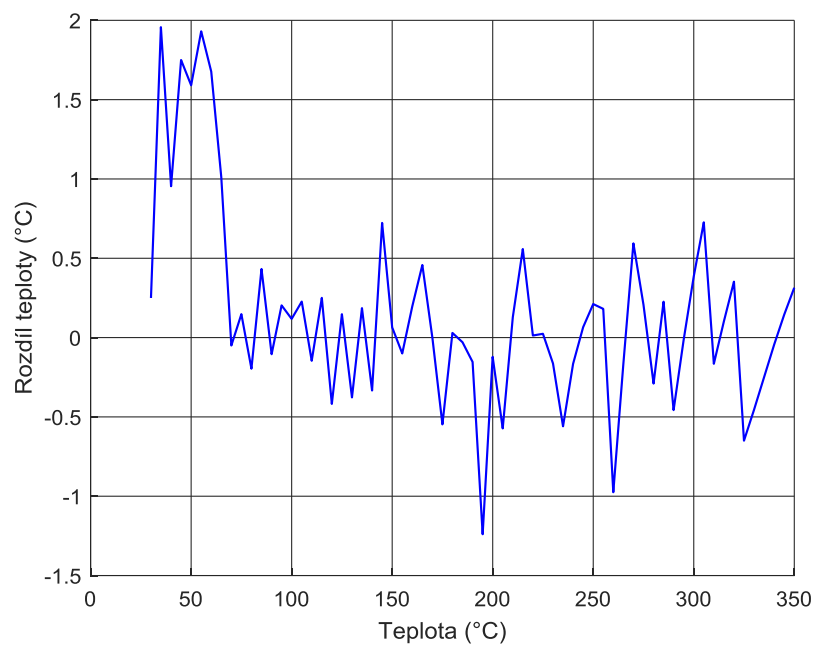
Obr. 34 Přepočet času na měřenou teplotu pro měřený teplotní rozsah 200  $^{\circ}\text{C}$  až 350  $^{\circ}\text{C}$  podle koeficientu 1



Obr. 35 Přepočet času na měřenou teplotu pro měřený teplotní rozsah 70  $^{\circ}\text{C}$  až 200  $^{\circ}\text{C}$  podle koeficientu 2



Obr. 36 Přepočítání času na měřenou teplotu pro měřený teplotní rozsah 30 °C až 70 °C podle koeficientu 3



Obr. 37 Porovnání rozdílu mezi vypočtenou teplotou a referenční teplotou v celém teplotním rozsahu pokrytém časovým luminiscenčním principem měření

## 7.5 Ověření možností algoritmu pro využití principu amplitudové luminiscenční metody

Tento vyhodnocovací princip měření spočívá v přepočtu amplitudy na měřenou teplotu. Bylo zjištěno, že maximální velikosti luminiscenčních amplitud pro jednotlivé sondy sloužících pro přepočet signálu měřené teploty v případech nízkých teplot jsou různé. Lze však využít teplotní amplitudovou luminiscenční závislost pro nízké teploty. Tento princip vyhodnocení je možné uplatnit pro rozsah  $-30^{\circ}\text{C}$  až  $55^{\circ}\text{C}$ . Amplitudová teplotní závislost jednotlivých testovaných sond je znázorněna grafu uvedeném na Obr. 27. Aby bylo možné použít tento vyhodnocovací princip, je potřeba, zaznamenat úroveň o maximální amplitudy luminiscenčního signálu měřený parametr 2 při definované teplotě. Za pomoci časové luminiscenční metody lze provést vyhodnocení teploty pomocí optického signálu při teplotě  $140^{\circ}\text{C}$ . Uvedený navržený princip kalibrace je zřejmý také v uvedeném vyhodnocovacím algoritmu znázorněném na Obr. 41. Časová luminiscenční metoda umožňuje vyhodnocení dat i bez kalibrace maximální amplitudy, která může být pro jednotlivé sondy mírně odlišná. Důležité je pouze to, aby hodnota luminiscenčního signálu byla nad stanovenou mezí. Vstupním parametrem do vyhodnocovací rovnice (7.1) je údaj  $x_p$  počítaný podle následující rovnice (7.2). Průběh teplotní závislosti vstupního parametru  $x_p$  ukazuje graf znázorněný na Obr. 38.

$$x_p = (\text{parametr 2} - \text{amplituda}_{140}) \cdot 100 \quad (7.2)$$

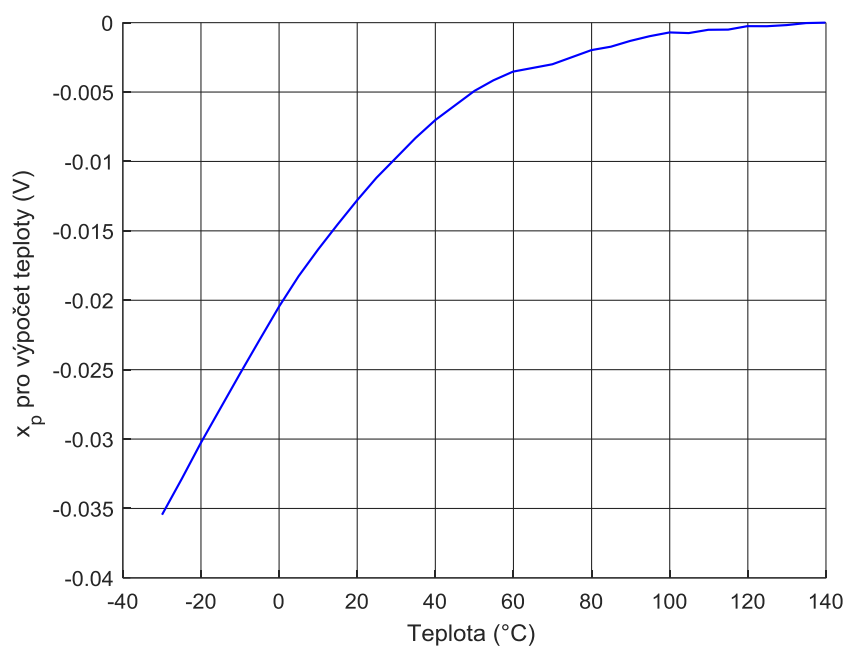
Pro uvedenou rovnici platí následující:

$x_p$  - Vstupní parametr pro výpočet teploty podle luminiscenční amplitudové metody dle rovnice (7.1).

*parametr 2* - Měřený údaj parametr 2 vstupního signálu dle informací na Obr. 29.

*amplituda 140* - Hodnota napětí pro měřený *parametr 2* při teplotě  $140^{\circ}\text{C}$ .





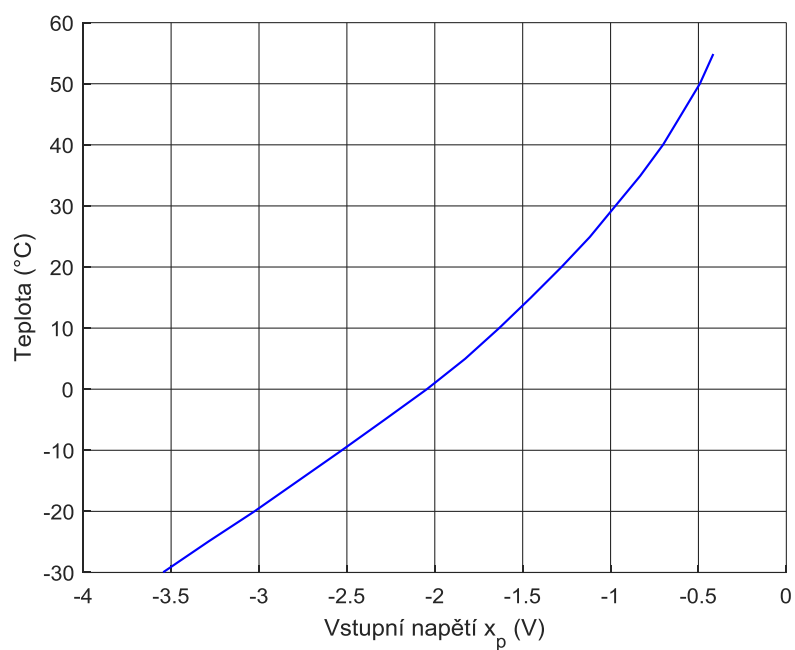
*Obr. 38 Průběh teplotní závislosti vstupního parametru  $x_p$  pro výpočet teploty v rozsahu teploty -30 až 140 °C*

Teplotu na základě amplitudového vyhodnocení lze pro teplotní rozsah -30 °C až 55 °C přepočítat na základě výše uvedené rovnice (7.1) s koeficienty uvedenými v Tabulka 5.

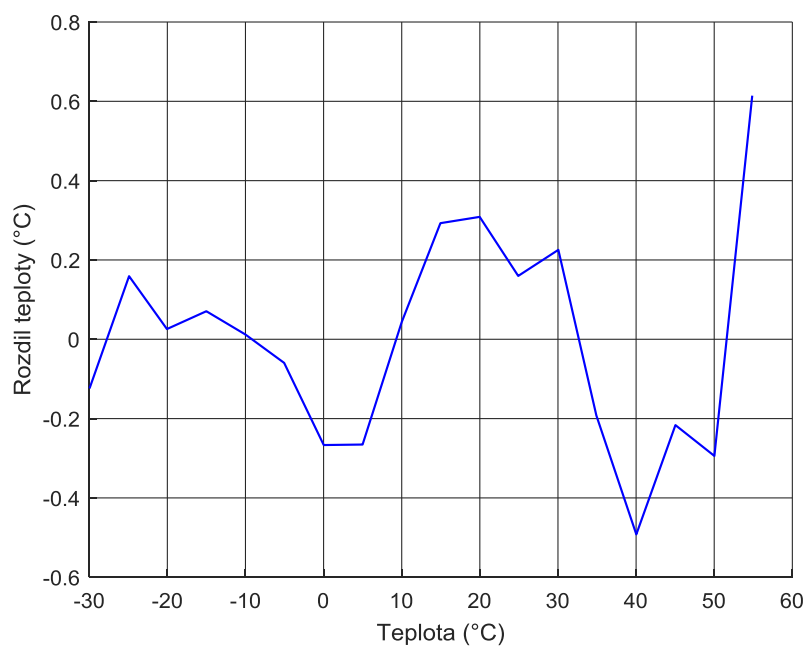
*Tabulka 5 Koeficienty pro rovnici přepočtu využívající princip amplitudové metody*

Verze koeficientů	Teplotní rozsah	Koeficient					Spolehlivost rovnice
		a	b	c	d	e	
1	-30 °C až 55 °C	80,152	72,382	26,692	6,2388	0,5642	0,9999

Výsledky přepočtů pomocí uvedené metody uvádí graf na Obr. 39. Porovnání rozdílů mezi výslednou přepočítanou teplotou a referenční teplotou uvádí graf na Obr. 40.



*Obr. 39 Průběh výpočtu teplotní závislosti na základě luminiscenční amplitudy pro teploty -30°C až 55°C*



*Obr. 40 Porovnání rozdílu mezi vypočtenou teplotou a referenční teplotou pro amplitudovou luminiscenční metodu pro teploty -30°C až 55°C*

## 7.6 Návrh algoritmu pro sjednocení využití jednotlivých metod

Na základě analýzy vstupního teplotně závislého signálu, který je uveden na Obr. 29 byl sestaven návrh vyhodnocovacího algoritmu pro účely přepočtu optického signálu na měřenou teplotu pro použití v širokém teplotním měřicím rozsahu. Řešení využívá kombinace jednotlivých vyhodnocovacích metod. Uvedený algoritmus musí být navržený tak, aby umožňoval bezpečně dle aktuálně zvolené metody přepočítat měřenou teplotu v širokém teplotní rozsahu na základě přijatého signálu z teplotního optického sensoru. Algoritmus je vyobrazen na následujícím Obr. 41. Názorně jsou zde uvedena rozhodovací kritéria, podle kterých dochází k výběru vyhodnocovací metody. Podle aktuálně měřeného signálu se pak algoritmus větví a je možné převést vstupní signál na měřenou teplotu dle definovaných rovnic. Kritéria volby vyhodnocovací metodiky jsou závislá na aktuálních hodnotách vstupního signálu. Vyhodnocovací algoritmus počítá s těmito vstupními parametry:

Měřený parametr 1 - Měřené vstupní napětí při neaktivní luminiscenci.

Měřený parametr 2 - Měřené vstupní napětí při aktivní luminiscenci.

Měřený parametr 3 - Měřená doba poklesu luminiscenčního signálu po vypnutí budícího signálu.

Vstupní luminiscenční signál je periodického průběhu o frekvenci 4 Hz. Sestupná hrana signálu je teplotně závislá. Vyhodnocení dat za účelem převodu teploty je možné vykonávat až na konci této periody vstupního optického signálu, když jsou známy všechny potřebné parametry pro přepočet signálu.

Jednotlivé kroky jsou ve vývojovém algoritmu znázorněny číselně. Významy a důležitosti jednotlivých kroků jsou uvedeny zde:

Krok 1:

Tento krok následuje po stratu vyhodnocovacího algoritmu. Cílem je provést zjištění, zda má luminiscenční signál označený jako *parametr 2* dostatečnou amplitudu. V případě, že se jedná o teploty do 500 °C, je to signál luminiscenční. V případě, že se jedná o teploty nad 500 °C, jde o signál principu záření černého tělesa. Rozhodovací úroveň pro platnost tohoto měřeného *parametru 2* byla stanovena na hodnotu napětí 1,2 V.

Krok 2:

V případě, že je změřená úroveň pod stanoveným limitem hodnoty napětí, tak není možné optický signál převést na údaj o měřené teplotě. Nelze považovat optický signál za platný pro vyhodnocení teploty. Měření musí být označeno za neplatné.

Krok 3:

Zjištění, zda má *parametr 1* vstupního měřeného signálu dostatečnou amplitudu pro to, aby bylo možné převést signál na teplotu pomocí rovnice pro vyhodnocení pomocí metody záření černého tělesa. Vyhodnocení je možné pouze v případě, že amplituda tohoto měřené hodnoty

*parametr 1* je větší než 0,65 V tak je možné uvažovat o využití metody přepočtu za pomoci využití záření černého tělesa.

Krok 4:

V tomto kroku je možné provést přepočet teploty na základě rovnic pro vyhodnocení pomoci záření černého tělesa. Přepočet se provádí pomocí využití měřeného údaje *parametr 1*.

Krok 5:

Tento krok přichází v případě, že není možné vyhodnotit amplitudu pro přepočet na měřenou teplotu za pomoci využití metody záření černého tělesa. V tomto kroku se rozhoduje, jakou luminiscenční metodu je možné využít. Rozhoduje se zde, zda je možné využít časovou, nebo amplitudovou luminiscenční metodu. Rozhodnutí probíhá na základě změřené doby trvání dohasínání luminiscenčního signálu. Jedná se o porovnávání časového změřeného údaje *parametr 3*. V případě, že je doba vyhasínání luminiscenčního signálu vyšší než 14 ms pro případ nastavení poklesu luminiscenčního poklesu signálu 0,4 V, provádí se výpočet za pomoci využití principů amplitudového luminiscenčního signálu.

Krok 6:

Zde se provádí vyhodnocení na základě časové luminiscenční metody. Vstupní měřený *parametr 3* je vstupním údajem pro rovnici přepočtu teploty.

Krok 7:

Tento krok provádí kontrolu, zda byla provedena kalibrace teploty za pomoci využití amplitudové luminiscenční závislosti. V případě, že kalibrace nebyla provedena, tak není možné měřenou teplotu vyhodnotit. Měření je neplatné.

Krok 8:

V případě, že měřený algoritmus neobsahuje informaci o referenční amplitudě pro měřenou amplitudovou luminiscenční metodiku. Není možné amplitudovou luminiscenční metodiku pro převod na měřenou teplotu využít. Měření musí být označeno za neplatné.

Krok 9:

Využití metody pro přepočet teploty z optického signálu za pomoci využití principů amplitudové luminiscenční metody. Amplituda luminiscenčního měření je přepočítána na údaj o měřené teplotě pomocí vyhodnocovací rovnice. Vstupním údajem pro výpočet je *parametr 2*. Výpočet teploty se provádí na základě teplotní závislosti amplitudy luminiscenčního signálu, která je použitelná od teplot -30 °C až 70 °C.

Krok 10:

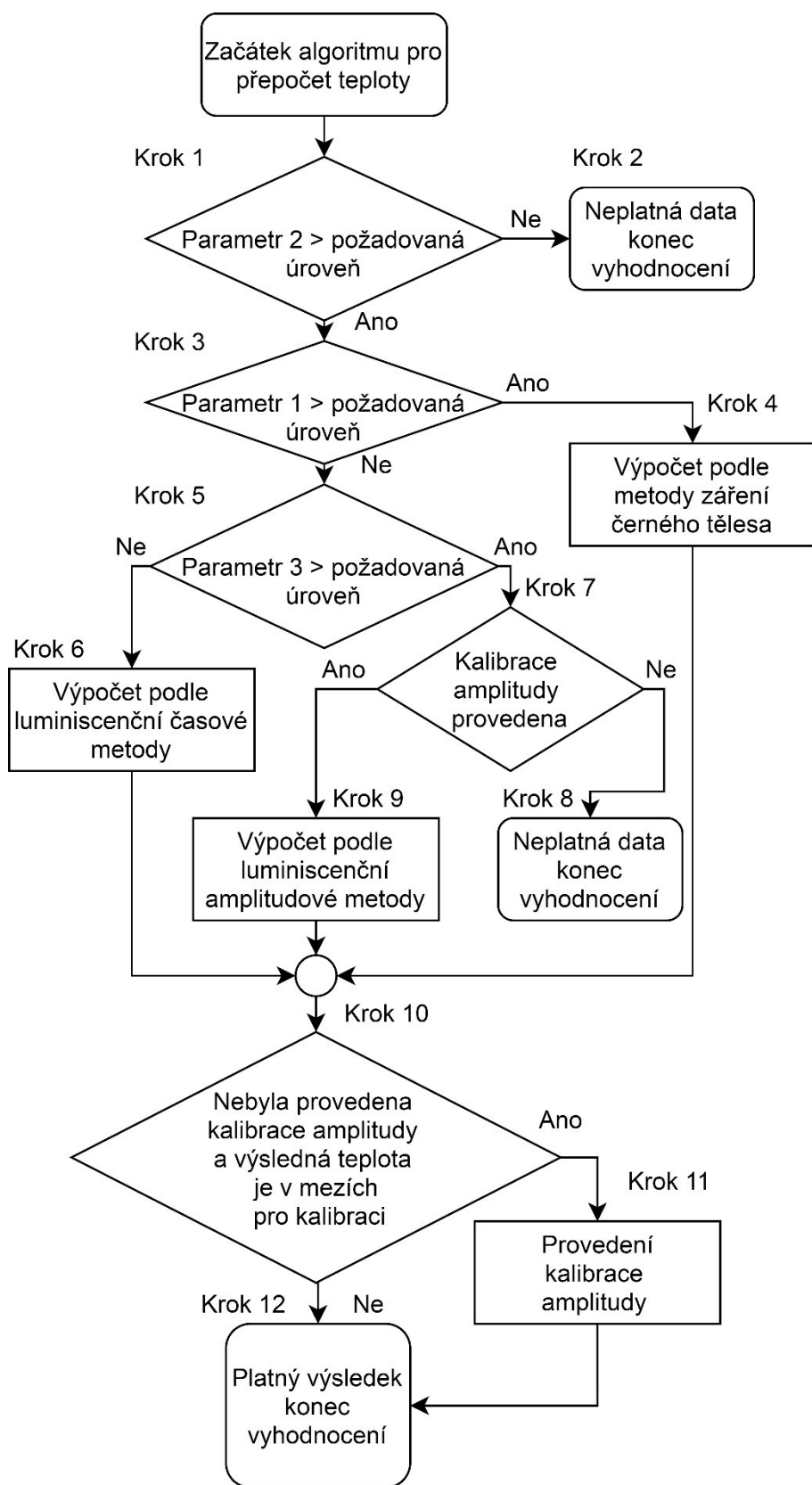
V tomto kroku se provádí kontrola, zda se měřená teplota nachází v teplotním rozsahu určeném pro potřebnou kalibraci, která je důležitá pro amplitudové luminiscenční měření.

Krok 11:

V tomto kroku se zaznamená údaj o maximální luminiscenční amplitudě, při známé teplotě, která byla získána za pomoci vyhodnocení pomocí principů luminiscenční časové metody. V případě, že kalibrace nebyla provedena, tak se provede uložení hodnoty maximální amplitudy luminiscence *parametr 2* z aktuálního měření. Údaje z optické teplotní sondy je pak možné využít pro měření pomocí amplitudového luminiscenčního měření.

Krok 12:

Konec měřicího cyklu s platným výsledkem měření o teplotě.



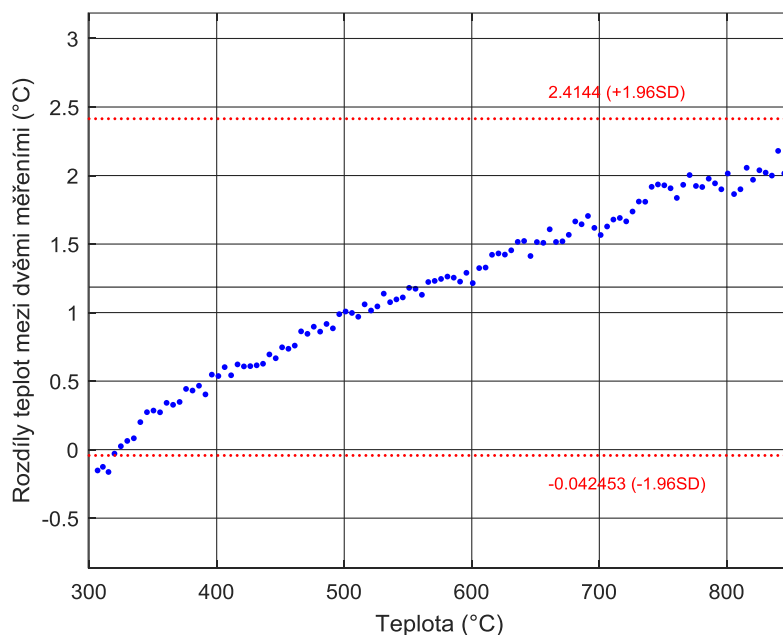
Obr. 41 Návrh vyhodnocovacího algoritmu pro měření v širokém teplotním rozsahu

## 8 Ověření výsledků navržené metodiky zpracování dat s optických snímačů

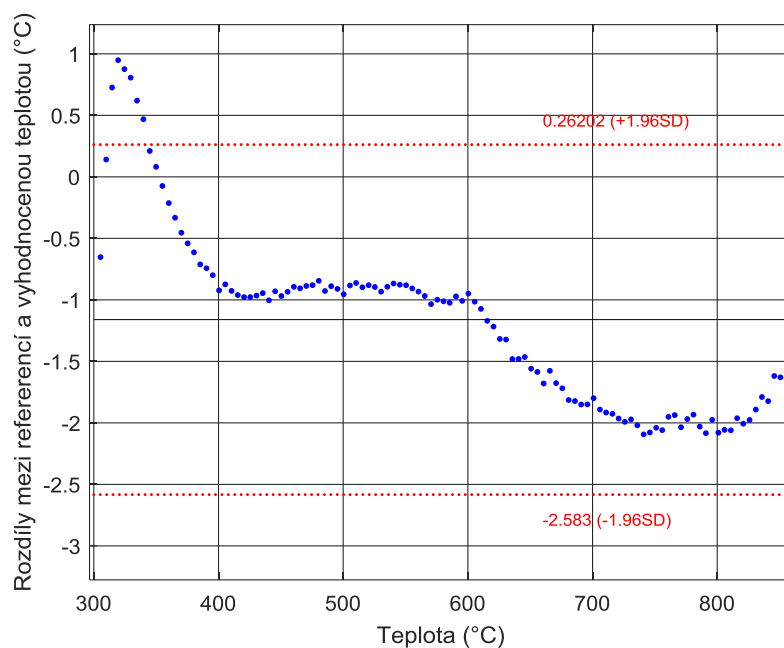
Tato kapitola se zabývá ověření přepočtu navržených vyhodnocovacích rovnic. Pro porovnání principu měření bylo využito metody Bland - Altmanova diagramu, který porovnává mezi sebou výsledky dvou nezávislých měření.

### 8.1 Porovnání vyhodnocení metodiky na základě měření černého tělesa

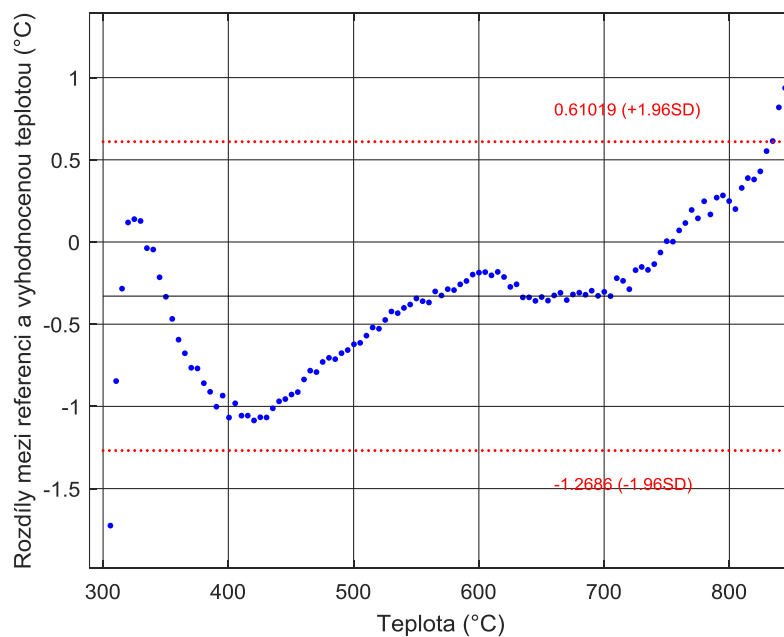
Vyhodnocení přesnosti metodiky na základě záření čelného tělesa bylo porovnání vyhodnocení dat za pomoci využití Bland - Altmanova diagramu. Níže uvedený graf diagramu na Obr. 42 popisuje porovnání dvou měření za pomoci užití definované vyhodnocovací rovnice pro vyhodnocení teploty pomocí metody záření černého tělesa. Jedná se o užití dat z totožné sondy pro opakující se měření při stejných vstupních podmínkách. Z grafu je názorná přesnost vyhodnocení, odchylka měření, která se nachází pro teplotní oblast 300 °C až 850 °C v rozsahu do 2,5 °C. Následující grafy uvedené na Obr. 43 a Obr. 44 pak porovnávají vyhodnocení teplot po přepočtu z optické sondy 1 a 2 ve srovnání s referenční teplotou.



Obr. 42 Bland - Altmanův diagram pro porovnání vyhodnocení teplotních dat vypočítaných pomocí rovnic z opakovaných dvou měření na základě užití vyhodnocovací metody záření černého tělesa



Obr. 43 Bland - Altmanův diagram porovnávající vyhodnocení teplot po přepočtu z optické sondy 1 ve srovnání s referenční teplotou.



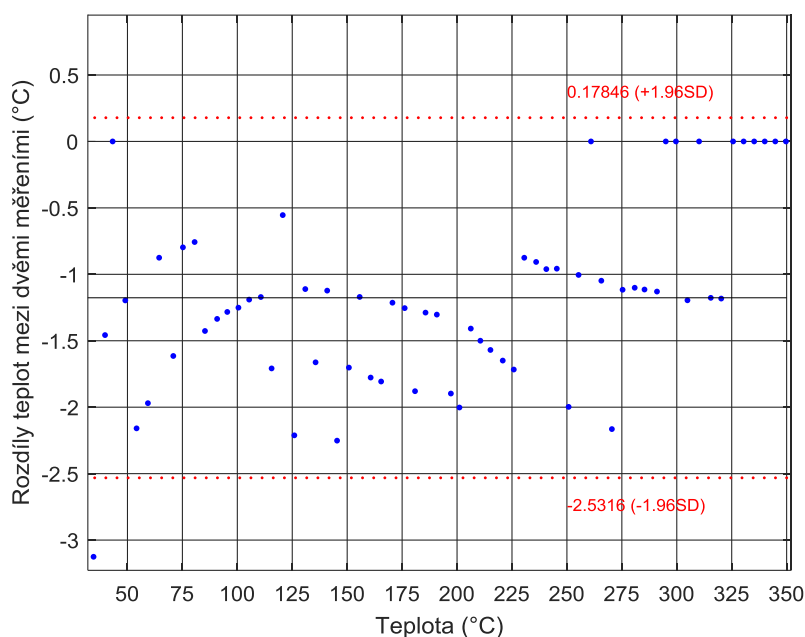
Obr. 44 Bland - Altmanův diagram porovnávající vyhodnocení teplot po přepočtu z optické sondy 2 ve srovnání s referenční teplotou.



## 8.2 Porovnání vyhodnocovací metodiky na základě měření časové luminiscence

Tato část porovnává výsledky měření teplot, kterých bylo dosaženo na základě využití časové luminiscenční vyhodnocovací metody.

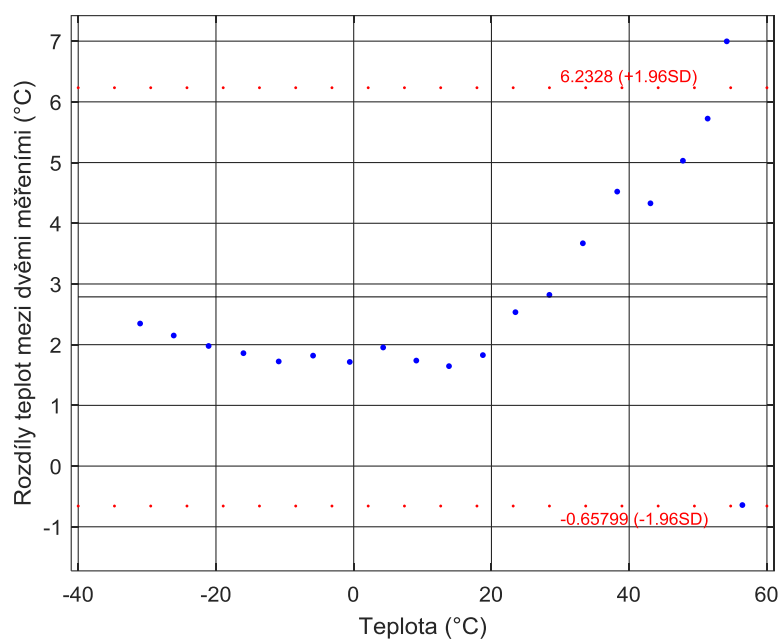
Následující graf na obrázku Obr. 45 ukazuje porovnání vyhodnocení dat za pomoci využití Bland - Altmanova diagramu.



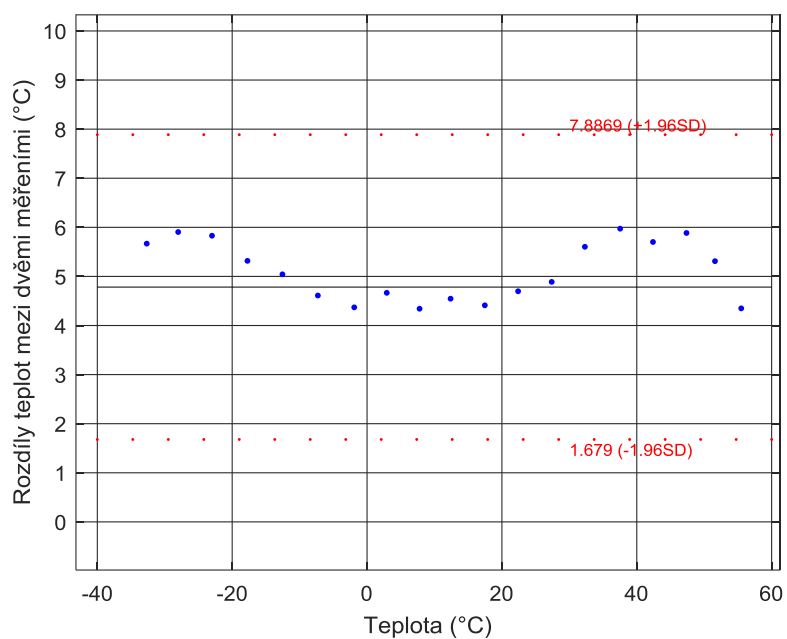
*Obr. 45 Bland - Altmanův diagram pro porovnání vyhodnocení dat na základě užití časové luminiscenční vyhodnocovací metody*

## 8.3 Porovnání vyhodnocovací metodiky na základě měření luminiscenční amplitudy

V této části je využito porovnání mezi dvěma nezávislými sondami, při kterých bylo uplatněno měření pomocí navržených rovnic. Kalibrace maximální amplitudy byla provedena pro každou sondu zvlášť. Byla uložena maximální hodnota amplitudy při teplotě 140 °C. Porovnání přesnosti ukazuje Bland - Altmanův diagram na Obr. 46, který porovnává srovnání sondy 1 a sondy 2. Následující diagram na Obr. 47 znázorňuje porovnání přesnosti mezi sondami 1 a 3. Přesnosti sond jsou odlišné.



Obr. 46 Bland - Altmanův diagram pro porovnání vyhodnocení dat na základě užití amplitudové luminiscenční vyhodnocovací metody porovnání sondy 1 a sondy 2



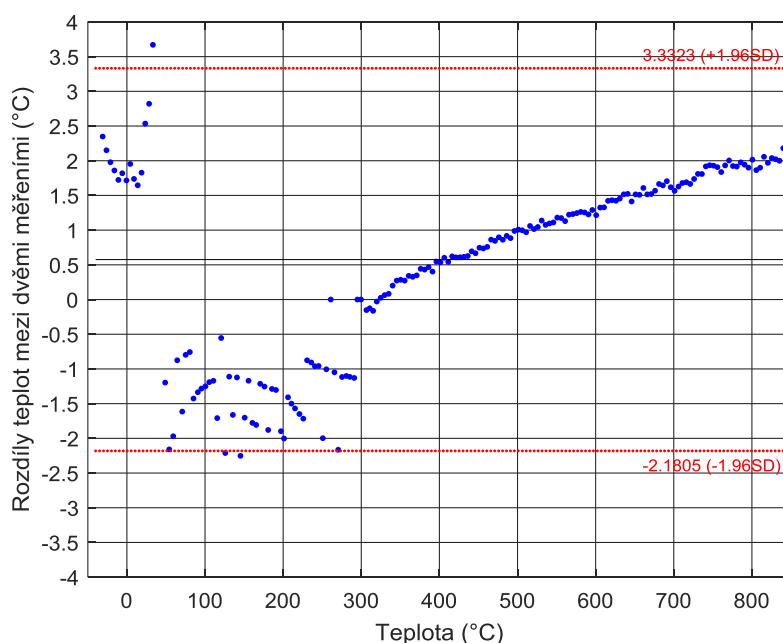
Obr. 47 Bland - Altmanův diagram pro porovnání vyhodnocení teplotních dat na základě užití amplitudové luminiscenční vyhodnocovací metody porovnání sondy 1 a sondy 3

## 8.4 Porovnání vyhodnocení metodiky v celém teplotním měřicím rozsahu

Tato část se zabývá porovnáním možné přesnosti pro celý teplotní měřicí rozsah -30 až 850 °C pro použití kombinace vyhodnocovacích metod. Pro jednotlivé teplotní rozsahy měřené pomocí vyhodnocovacích metod uvedených v tabulce na grafu uvedeném na Obr. 48 je znázorněno porovnání jednotlivých metod v rámci jednoho grafu, který uvádí problematiku přesnosti celého širokého teplotního měřicího rozsahu. Teplotní rozsah amplitudové luminiscenční metody použité pro nízké teploty porovnává výsledky měření přepočtu na teplotu při porovnání mezi jednotlivými sondami.

*Tabulka 6 Využití zvolených metod a jejich možné přesnosti v jednotlivých teplotních rozsazích na základě měření*

Teplotní rozsah	Zvolení metoda	Možné přesnosti v teplotním rozsahu
-30 °C až 45 °C	Luminiscenční amplitudová	7 °C
45 °C až 350 °C	Luminiscenční časová	2,5 °C
350 °C až 850 °C	Záření černého tělesa	3 °C



*Obr. 48 Bland - Altmanův diagram pro porovnání vyhodnocení teplotních dat z teplotního rozsahu -30 až 850 °C*

## 8.5 Možné využití vyvinutých metod ve vybraných průmyslových aplikacích

Dle rešerší bylo zjištěno několik způsobů měření pro metody pomocí luminiscenčního měření. Získaný výkon z luminiscenčního měření je závislý na typu použité budící fotodiody přesněji vlnové délky budícího světla. V prostudovaných případech se jednalo většinou jen o laboratorní využití takového sestrojeného měřicího řetězce. Je však složité využít luminiscenční senzor pro praktické použití, jelikož při sestrojení každého kusu vzorku luminiscenčního teploměru, může docházet k nepřesnostem umístění luminiscenčního materiálu na rozhraní krystal vlákno. Také je známo, že vlivem použití různé délky, tvaru a ohybu optického vlákna dochází ke změnám přenosu signálu z optického vlákna.

Díky nalezení metod pro pokrytí měřicího rozsahu za pomoci užití luminiscenčních metod a záření černého tělesa s možností auto kalibrační principů luminiscenčního amplitudového měření, by se mohl prosadit optický senzor v oblasti průmyslového použití.

Nalezení řešení může mít možné uplatnění v oblasti průmyslové automatizace při obrábění a svařování. Problematika měření teploty pomocí termočlánků při svařování je uvedena v diplomové práci „Měření teplotních cyklů svarových spojů oceli P92“. [31] U termočlánku je nutné zajistit při měření galvanické oddělení.

V průmyslových oblastech, má dodržení přesné teploty při procesu výroby mnohdy zásadní vliv na kvalitu cílového výrobku. Dnešní výrobní procesy jsou připraveny tak, aby dané výrobky byly produkovány za předpokladu dodržení předepsaných podmínek. Případné rozšíření automatizační techniky o nové průmyslové senzory teplot může přinést možnosti zrychlení výrobních procesů, ve kterých je stanoven výrobní proces s časovými rezervami kvůli ohledu na předpokládané provozní teploty, protože například pro tyto oblasti není možno teploty měřit z důvodu nevhodných senzorů. Při použití vláknových senzorů může být známa teplota z procesů v místech, ve kterých to nyní není z hlediska elektrického rušení možné.

Je zde potřeba zmínit také současně rozvíjející se koncept Industry 4.0, který počítá s co největším využitím dat z výrobních procesů. V případech, ve kterých by bylo možné provádět přesná měření teploty výrobků při obrábění, či svařování za pomoci poměrně levného optického senzoru, tak bylo by možné tyto informace využívat pro diagnostiku nekvalitních výrobků i v oblastech pro, která jsou v dnešní době využívána speciální a drahá řešení, jako například termovize.

## 9 Diskuze

Tato práce provedla zhodnocení a návrh vyhodnocovacích metod pro zpracování dat optického signálu z teplotně závislé optické sondy pro užití měření teplot v širokém měřicím rozsahu  $-30^{\circ}\text{C}$  až  $850^{\circ}\text{C}$ . Byl navrhnut a otestován vyhodnocovací algoritmus, který umožňuje měření teploty z optického měřicího řetězce za pomoci využití tří vyhodnocovacích metod. Optická teplotně závislá data jsou získávána pouze za pomoci využití jednoho fotodetektoru pro pokrytí celého teplotního měřicího rozsahu. Pro oblast měření vyšších teplot je využíváno principu záření černého tělesa. Hlavním cílem této práce bylo zkoumání možností zpracování signálu na rozhraní kombinace metod. Práce tedy využila známých principů časového luminiscenčního měření, které jsou popisovány v dostupných publikacích. Například příspěvek [2] se zabývá časovým luminiscenčním měřením pouze do  $200^{\circ}\text{C}$ . Stejného principu pro teplotní rozsah do  $300^{\circ}\text{C}$  je využito i v řešení této práci. Avšak díky optimalizaci vyhodnocovacího algoritmu je možné využít také metody pro měření vyšších teplot za pomoci principů záření černého tělesa. Příspěvek [6] se také zabývá myšlenkou kombinace vyhodnocovací metody za pomoci luminiscence a záření černého tělesa. Tento příspěvek však popisuje využití laseru pro buzení teplotně závislého luminiscenčního signálu. V uvedeném příspěvku nejsou obsaženy podrobnosti o metodice návrhu kombinace vyhodnocovacího algoritmu, tak jak uváděno tato práci. Příspěvek také nepopisuje rozsah měření pro záporné teploty. Tato řešená práce popisuje problematiku návrhu vyhodnocovacího algoritmu podrobně s popisem kritérií pro přepínání vyhodnocovacích metod. Problematika řešeného tématu této práce řeší také měření nízkých teplot za pomoci nalezení algoritmu pro měření teplot zpracováním amplitudově teplotně závislého luminiscenčního signálu. Za přínos lze považovat vyřešení auto kalibrační metody amplitudy. Kdy za pomoci časové luminiscenční metody je zjištěna maximální amplituda luminiscenčního signálu při teplotě  $140^{\circ}\text{C}$ . Po této kalibraci je pak možné měřit teploty za pomoci využití teplotní amplitudové závislosti. Při ověření měření těchto nízkých teplot však byla zjištěna nižší přesnost při porovnání mezi jednotlivými sondami v rozsahu  $-30$  až  $45^{\circ}\text{C}$  přesnost  $7^{\circ}\text{C}$ . Tato nepřesnost je z důvodu vlivu nízké amplitudové luminiscenční závislosti a z důvodu možné chyby při auto kalibraci za pomoci časové luminiscenční metody. Optický teplotní sensor, který využije navržených vyhodnocovacích metod lze využít v aplikacích, které vyžadují vyšší přesnost mimo rozsahy nízkých teplot. Může se jednat o případy, které sice nízkou teplotu potřebují měřit, avšak nízká teplota se v aplikacích vyskytuje například mimo pracovní časy technologického procesu a není potřeba, aby byla měřena s vysokou přesností. Může se jednat například o využití při měření teplot při svařovacím procesu, pro který optická metoda měření teplot přináší výhody galvanického oddělení a odolnost proti magnetickému rušení.

Výhody navrženého algoritmu:

- Pokrytí širokého teplotního měřicího rozsahu  $-30^{\circ}\text{C}$  až  $850^{\circ}\text{C}$ .
- Vyhodnocovací metodika využívá signál z optického měřicího řetězce s dostupnou křemíkovou diodou.
- Algoritmus je odolný vůči nepřesné velikosti maximální amplitudy při luminiscenci. Navržený algoritmus využívá auto kalibrační metodu pro amplitudové luminiscenční měření.

Nevýhody navrženého algoritmu:

- Malá přesnost pro měření nízkých teplot.
- Před měřením nízkých teplot musí sonda projít teplotou 140°C z důvodu kalibrace maximální teplotně závislé luminiscenční amplitudy.

## 10 Závěr

Tato práce popisuje problematiku měření teplot pomocí kombinace optických metod v širokém teplotním rozsahu. Cílem práce bylo nalézt možnosti vyhodnocení teplot pomocí využití kombinace optických metod za účelem měření teplot v širokém teplotním rozsahu od  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V úvodních částech této práce je uveden rozbor důvodů, výhod a rizik při užití optických metod za účelem měření teploty. Dále je v práci uveden rozbor problematiky možností měření pomocí optických metod. Každá z uváděných metod se vyznačuje svými výhodami a nevýhodami. Jednou základní nevýhodou těchto optických měřicích metod bývá omezení teplotního měřicího rozsahu. Současná doba umožňuje využití měření teplot optickými metodami, které jsou založeny na principech Braggovských mřížek, luminiscence, nebo záření černého tělesa. Při využití Braggovských se využívá speciálně upraveného vlákna. Toto řešení využítá optická sonda nevyužívala.

Hlavní cíl této práce byl zaměřen na stanovení a nalezení možnosti přepočtu signálů pro měření teplot v širokém teplotním rozsahu za pomoci kombinace jednotlivých metod. Údaj ze vstupní optické sondy bylo potřeba přepočítat na údaj o teplotě v jednotkách  $^{\circ}\text{C}$ . Využitá teplotní optická sonda poskytovala za pomoci využití měřicího řetězce vstupní data na základě luminiscenční metody a metody záření černého tělesa. Jednalo se o obdélníkový vstupní signál, který měl teplotně závislou strmost sestupné hrany. Pro vyhodnocení dat nebyl využit spektrometr, ale celý vyhodnocovací systém využíval pouze údaje o naměřené vstupní amplitudě z křemíkové fotodiody. Pro navržení metodiky a ověření možnosti využití dat ze vstupního signálu bylo potřeba provést měření teplotních závislostí testovacím měřicím řetězcem s referenčním teploměrem. Bylo potřeba zhodnotit vhodnost využití jednotlivých možných metod pro přepočet získaného signálu na měřenou teplotu. Na základě vstupních údajů bylo zjištěno, že je potřeba pro převod teploty ze signálu z dostupné optické teplotní sondy využívat luminiscenční amplitudovou a časovou metodu. Pro vysoké teploty od  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  je potřeba využívat principů záření černého tělesa. Problematickou částí celého řešení bylo stanovení limitů a vyhodnocovacího algoritmu, který řeší přechody mezi jednotlivými vyhodnocovacími metodami. Teplotní optický měřicí systém pro tyto přechody mezi danými metodami využívá následující kritéria. Pro vyhodnocení pomocí metody záření černého tělesa je potřebné, aby amplituda vstupního signálu byla vyšší, než je stanovená mez při vypnutí budícího signálu pro luminiscenci a po odeznění luminiscence. Vyhodnocení pomocí časových luminiscenčních metod je možné provést pouze v případě, že se signál není přehlacen amplitudou signálu generovanou na bázi záření černého tělesa. Další podmínkou je, aby se změřený čas poklesu luminiscence nacházel ve stanovených mezích. Pokud není změřený čas ve stanovených mezích a nejsou splněny úrovně amplitudy pro vyhodnocení pomocí metody záření čelného tělesa, jedná se o teplotní oblast nízkých a záporných teplot a vyhodnocení se provádí na základě přepočtu amplitudového luminiscenčního signálu. Aby bylo možné tuto amplitudovou luminiscenční metodu využívat, je nutné znát úroveň amplitudy, která byla zjištěna v teplotní oblasti, ve které bylo provedeno měření pomocí časové luminiscenční metody.

Navržený algoritmus pro přepočet teploty byl prakticky testován a ověřován. Tato práce ověřila možnosti měření teplot pomocí tří optických metod. V práci je uveden rozbor možností a návrhu vyhodnocovacího algoritmu, který slouží pro převod optického napěťového signálu z křemíkového

fotodetektoru na údaj o teplotě v jednotkách °C pro užití v širokém teplotním měřicím rozsahu. Výsledky a zhodnocení přesností uvádí grafy uvedené v závěrečných kapitolách této práce. Každá vyhodnocovací metoda umožňuje měření teploty s definovanou přesností. Také přesnost vyhodnocovacích metod v teplotní oblasti při přecházení mezi jednotlivými metodami je dána správným nastavením limitů, které jsou zvoleny pro použití jednotlivých vyhodnocovacích metod. Výsledek této práce doplňuje řešení pro uváděné publikované články, které se většinou zabývají obdobnou problematikou měření pomocí optických metod pro určitou úzkou teplotní oblast. Toto uváděné řešení však umožňuje měření teplot z širokého teplotního rozsahu za pomoci metody kombinace metod. O této myšlence kombinace se zmiňuje také článek rozebíraný v diskuzi. Je však potřeba zmínit, že vyhodnocovací algoritmus je potřeba vždy přizpůsobit možnostem použité vstupní vyhodnocovací elektroniky z použitým fotodetektorem. Nově nalezené a ověřené řešení vyhodnocovacích metod zpracování signálu z optického teploměru může nalézt možnosti uplatnění v oblastech z potřebami galvanického oddělení a odolnosti vůči elektromagnetickému rušení. Jako zajímavý příklad využití se jeví kontrola teploty při svařování kovů. V situacích, ve kterých je vhodné sledovat teploty při svařování. V případě využití termočlánků pro měření při svařování může docházet k problémům kvůli vlivu magnetického rušení, nebo v některých situacích může být potřeba využít galvanického oddělení teplotních snímačů od měřeného svařovaného materiálu za pomoci využití optického teplotního měřicího řetězce.



## Bibliografie

- [1] SCOTT, David M. *Industrial process sensors*. 2008. United States: Crc Press, 2008. ISBN 978-1-4200-4416-4.
- [2] WEN-QING, Wang, Zhang LEI a Zhang WEI-HUA. Temperature Monitoring System of Electric Apparatus Based on Optical Fiber Fluorescence. In: *2014 Fifth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications* [online]. IEEE, 2014, s. 993-995 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: doi:10.1109/ISDEA.2014.217
- [3] ZHAO, Yong, Mao-Qing CHEN, Ri-Qing LV, Peng WANG a Xin FENG. Small and Practical Optical Fiber Fluorescence Temperature Sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* [online]. 2016, **65**(10), 2406-2411 [cit. 2020-12-06]. ISSN 0018-9456. Dostupné z: doi:10.1109/TIM.2016.2575241
- [4] JINLING, Wu a Yang JUNHAI. Optic-fiber Sensor Based on Fluorescence Mechanism. In: *2010 International Conference on Optoelectronics and Image Processing* [online]. IEEE, 2010, s. 73-75 [cit. 2020-12-06]. ISBN 978-1-4244-8683-0. Dostupné z: doi:10.1109/ICOIP.2010.340
- [5] JIAJUN WANG, , E. LALLY, BO DONG, JIANMIN GONG a ANBO WANG. Fabrication of a Miniaturized Thin-Film Temperature Sensor on a Sapphire Fiber Tip. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2011, **11**(12), 3406-3408 [cit. 2020-12-06]. ISSN 1530-437X. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2011.2160340
- [6] AIZAWA, Hiroaki, Tooru KATSUMATA, Shuji KOMURO, Takitaro MORIKAWA, Hiroaki ISHIZAWA a Eiji TOBA. Fiber-optic thermometer for high temperature measurement. In: *2006 SICE-ICASE International Joint Conference* [online]. IEEE, 2006, s. 1899-1902 [cit. 2020-12-06]. ISBN 89-950038-4-7. Dostupné z: doi:10.1109/SICE.2006.315280
- [7] JONES, Matthew a David BARKER. Use of Blackbody Optical Fiber Thermometers in High-Temperature Environments. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer* [online]. 2002, **16**(3), 306-312 [cit. 2020-12-06]. ISSN 0887-8722. Dostupné z: doi:10.2514/2.6707
- [8] DALZELL, C., T. HAN, I. RUDDOCK a D. HOLLIS. Two-Photon Excited Fluorescence in Rare-Earth Doped Optical Fiber for Applications in Distributed Sensing of Temperature. *IEEE Sensors Journal* [online]. 2012, **12**(1), 51-54 [cit. 2020-12-07]. ISSN 1530-437X. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2011.2132797
- [9] AUGOUSTI, A., K. GRATAN a A. PALMER. A laser-pumped temperature sensor using the fluorescent decay time of alexandrite. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 1987, **5**(6), 759-762 [cit. 2020-12-07]. ISSN 0733-8724. Dostupné z: doi:10.1109/JLT.1987.1075565
- [10] FERNICOLA, V. a L. CROVINI. Digital optical fiber point sensor for high-temperature measurement. *Journal of Lightwave Technology* [online]. **13**(7), 1331-1334 [cit. 2020-12-06]. ISSN 07338724. Dostupné z: doi:10.1109/50.400680
- [11] KIYOKAWA, Yuka, Tomomi SASAGAWA, Yusuke SUYAMA, Hiroaki AIZAWA, Tooru KATSUMATA, Shuji KOMURO a Takitaro MORIKAWA. Growth and evaluation of the Tb doped YAlO<sub>3</sub> crystals for the fiber-optic thermometer application. In: *2006 SICE-ICASE International Joint Conference*

- [online]. IEEE, 2006, s. 1617-1620 [cit. 2020-12-06]. ISBN 89-950038-4-7. Dostupné z: doi:10.1109/SICE.2006.315519
- [12] MIYAZAKI, Yukari, Megumi WATABIKI, T. SINDO, Hiroaki AIZAWA, Toru KATSUMATA a Shuji KOMURO. Deliberation of fluorescent material by used in low temperature measurement. 2009 ICCAS-SICE. IEEE, 2009. ISBN:978-4-907764-34-0, CD:978-4-907764-33-3.
- [13] FERNICOLA, V.C. a L. CROVINI. Digital signal processing for fiber-optic thermometers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* [online]. **44**(2), 447-450 [cit. 2020-12-07]. ISSN 00189456. Dostupné z: doi:10.1109/19.377876
- [14] MATVEENKO, V.P., I.N. SHARDAKOV, A.A. VORONKOV, N.A. KOSHELEVA, D.S. LOBANOV, G.S. SEROVAEV, E.M. SPASKOVA a G.S. SHIPUNOV. Measurement of strains by optical fiber Bragg grating sensors embedded into polymer composite material. *Structural Control and Health Monitoring* [online]. 2018, **25**(3) [cit. 2020-12-07]. ISSN 15452255. Dostupné z: doi:10.1002/stc.2118
- [15] ALQARNI, Sondos, Martin BERNIER a Christopher SMELSER. Annealing of High Temperature Stable Hydrogen Loaded Fiber Bragg Gratings. *IEEE Photonics Technology Letters* [online]. , 1-1 [cit. 2020-12-07]. ISSN 1041-1135. Dostupné z: doi:10.1109/LPT.2016.2518798
- [16] MORITA, Kentaro, Asuka OKABE, Sakiko ITO, Hiroaki AIZAWA, Tooru KATSUMATA, Shuji KOMURO a Takitaro MORIKAWA. Two dimensional temperature measurements by X-Y scanning of Er end doped silica fiber sensor. In: 2006 SICE-ICASE International Joint Conference [online]. IEEE, 2006, s. 1603-1606 [cit. 2020-12-06]. ISBN 89-950038-4-7. Dostupné z: doi:10.1109/SICE.2006.315516
- [17] JINLING, Wu, Han DENGKE a Liu HONGYUN. Study of a Miniature Probe Fluorescence Temperature Sensor. In: 2012 Fifth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation [online]. IEEE, 2012, s. 626-628 [cit. 2020-12-06]. ISBN 978-1-4673-0470-2. Dostupné z: doi:10.1109/ICICTA.2012.162
- [18] KATSUMATA, T., M. KANEDA, K. ORIHARA, Y. KANO, H. AIZAWA a S. KOMURO. Thermo-sensor using silicone composite with Cr doped garnet. In: *SICE Annual Conference 2007* [online]. IEEE, 2007, s. 2410-2413 [cit. 2020-12-06]. ISBN 978-4-907764-27-2. Dostupné z: doi:10.1109/SICE.2007.4421392
- [19] ZHAO, Yong, Rui-Jie TONG, Mao-Qing CHEN a Feng XIA. Fluorescence Temperature Sensor Based on GQDs Solution Encapsulated in Hollow Core Fiber. *IEEE Photonics Technology Letters* [online]. 2017, **29**(18), 1544-1547 [cit. 2020-12-06]. ISSN 1041-1135. Dostupné z: doi:10.1109/LPT.2017.2723624
- [20] WU, Jinling a Junhai YANG. A Fluorescence Optic Fiber Temperature Sensor Using Visible Wavelengths. In: 2010 International Conference on Optoelectronics and Image Processing [online]. IEEE, 2010, s. 8-10 [cit. 2020-12-06]. ISBN 978-1-4244-8683-0. Dostupné z: doi:10.1109/ICOIP.2010.339
- [21] *Ruby Thermometer :: Anton-Paar.com* [online]. Anton Paar, 2019 [cit. 2019-02-28]. Dostupné z: <https://www.anton-paar.com/corp-en/products/details/ruby-thermometer/>

- [22] SIEMENS: SITRANS TO500 [online]. siemens.com Global Website [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://w3.siemens.com/mcms/sensor-systems/en/process-instrumentation/temperature-measurement/fiber-optic-temperature-measurement/pages/sitrans-to500.aspx>
- [23] YUKARI MIYAZAKI, , Hiroaki AIZAWA, Toru KATSUMATA a Shuji KOMURO. Low temperature measurement using fluorescence thermometry. In: *2008 International Conference on Control, Automation and Systems* [online]. IEEE, 2008, s. 1004-1007 [cit. 2020-12-07]. ISBN 978-89-950038-9-3. Dostupné z: doi:10.1109/ICCAS.2008.4694646
- [24] KIYOKAWA, Yuka, Yuriko HASEGAWA, Hiroaki AIZAWA, Tooru KATSUMATA, Shuji KOMURO a Takitaro MORIKAWA. Fluorescence thermo-meter application of Eu doped Y2SiO5 crystal. In: *2006 SICE-ICASE International Joint Conference* [online]. IEEE, 2006, s. 1613-1616 [cit. 2020-12-06]. ISBN 89-950038-4-7. Dostupné z: doi:10.1109/SICE.2006.315518
- [25] AIZAWA, Hiroaki, K. TAKEI, Tooru KATSUMATA, Shuji KOMURO, Takitaro MORIKAWA, S. OGAWA a Eiji TOBA. *Temperature measurement using Er doped SiO/sub 2/ glass*. SICE 2004 Annual Conference: IEEE, 2005, **3**, 2494-2497. ISBN:4-907764-22-7.
- [26] SAN, Hongli, Song LIN a Danping JIA. Study on temperature monitoring system of electric device based on optical-fiber fluorescent. In: *2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments* [online]. IEEE, 2009, s. 2-266-2-270 [cit. 2020-12-06]. ISBN 978-1-4244-3863-1. Dostupné z: doi:10.1109/ICEMI.2009.5274583
- [27] FERNICOLA, V.C. a L. ROSSO. Time- and frequency-domain analysis of fluorescence lifetime for temperature sensors. In: *Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Conference Digest. CPEM 2000 (Cat. No.00CH37031)* [online]. IEEE, 2000, s. 587-588 [cit. 2020-12-06]. ISBN 0-7803-5744-2. Dostupné z: doi:10.1109/CPEM.2000.851146
- [28] VAŠINEK, Vladimír, , KOZIOREK, Marian BRANNY et al. *Konstrukce vysokoteplotní sondy*. 2020. Česká republika. CZ 34495 U1 Užitený vzor. Zapsáno 03.11.2020.
- [29] VAŠINEK, Vladimír, Jiří KOZIOREK, Marian BRANNY et al. *Vysokoteplotní sonda v pouzdře*. 2020. Česká republika. CZ 34496 U1 Užitený vzor. Zapsáno 03.11.2020.
- [30] VAŠINEK, Vladimír, Aleš VANDERKA, Jan VITÁSEK et al. *Zařízení k měření teplot vysokoteplotním senzorem*. 2019. Česká republika. CZ 33062 U1 Užitený vzor. Zapsáno 30.07.2019.
- [31] HAVELKA, Lukaš. *Měření teplotních cyklů svarových spojů oceli P92*. Ostrava, 2012. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Petr Mohyla.

## Seznam vlastních publikací a výstupů související s tématem práce

### Publikace přijaté a publikované:

- [MM1] MIKOLAJEK, M., MACHACEK, Z., KOZIOREK, J., Modern Sensor Technology for Alphanumeric Recognition in Metallurgy Industry. *Elektronika ir Elektrotechnika* [online]. 2014, **20**(5), 3-7 [cit. 2021-02-23]. ISSN 2029-5731. Dostupné z: doi:10.5755/j01.eee.20.5.7090

(D5/Q3, 290 / 584, *Electrical and Electronic Engineering* - údaje z roku 2014) - Scopus ScimagoJR, SJR: 0,305 (D7/Q4, 191 /249, *ENGINEERING, ELECTRICAL & ELECTRONIC* – údaje z roku 2014) - WoS JCR, Impact factor: 0,561, Průměrný centil 62 %, Počet citací: 5

- [MM2] MIKOLAJEK, M., MARTINEK, R., KOZIOREK, J., et al. Temperature Measurement Using Optical Fiber Methods: Overview and Evaluation. *Journal of Sensors* [online]. 2020, **2020**, 1-25 [cit. 2021-01-27]. ISSN 1687-7268. Dostupné z: doi:10.1155/2020/8831332

(D4/Q2 114/239 *Control and Systems Engineering*, D4/Q2 284/629 *Electrical and Electronic Engineering*, D5/Q3 66/124 *Instrumentation*, - údaje z roku 2019) - Scopus ScimagoJR, SJR: 0.373 (D6/Q3 127/266 *ENGINEERING, ELECTRICAL & ELECTRONIC*, D6/Q3, 38/64 *INSTRUMENTS & INSTRUMENTATION* – údaje z roku 2019) - WoS Impact factor: 1.595, Průměrný centil 54 %

- [MM3] MIKOLAJEK, M., OTEVREL, V., KOZIOREK J., SLANINA, Z.. Data Trends in Industry Automation Using .NET Framework. *IFAC-PapersOnLine* [online]. 2015, **48**(4), 418-423 [cit. 2021-02-23]. ISSN 24058963. Dostupné z: doi:10.1016/j.ifacol.2015.07.071

(D5/Q3, 122 / 216, *Control and Systems Engineering* - údaje z roku 2015) - Scopus ScimagoJR, SJR: 0,298 Průměrný centil 57 %, Počet citací: 10

**Vědeckovýzkumné výstupy z evidence VŠB-TUO:**

2020	Vysokoteplotní sonda v pouzdře	Vladimír Vašínek, Jiří Koziolek, Marian Branny, Jan Vitásek, Stanislav Hejduk, Aleš Vanderka, Robert Petřík, Martin Mikolajek, Mojmír Axman, Radim Hercík, Michal Prauzek, Radek Martinek, Jan Látal	PUV 2020-37770, 34496
2020	Konstrukce vysokoteplotní sondy	Vladimír Vašínek, Jiří Koziolek, Marian Branny, Chotěbuz, Stanislav Hejduk, Aleš Vanderka, Robert Petřík, Martin Mikolajek, Mojmír Axman, Radim Hercík, Michal Prauzek, Radek Martinek, Jan Látal	PUV 2020-37769
2019	Zařízení k měření teplot vysokoteplotním senzorem	Vašínek, Vanderka, Vitásek, Hejduk, Hercík, Axman, Petřík, Branny, Prauzek, Koziolek, Martinek, Mikolajek	PUV 2019-36345, 33062

## Seznam vlastních publikací a výstupů nesouvisející s tématem práce

### Publikace přijaté a publikované:

[MM4] MIKOLAJEK, M., KOZIOREK a J. Analysis of data throughput in communication between PLCs and HMI/SCADA systems. *PHOTONICS APPLICATIONS IN ASTRONOMY, COMMUNICATIONS, INDUSTRY, AND HIGH-ENERGY PHYSICS EXPERIMENTS* 2016. 2016, 2016-9-28, (10031). DOI: 10.1117/12.2249300. Dostupné také z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2249300>

[MM5] MIKOLAJEK, M., VALA, D., FREIEDRISCHKOVA, K., KOZIOREK, J., HORAK, B., Proposal discharging station compatible with CHAdeMO automotive standard. *IFAC-PapersOnLine*. 2018, 2016-9-28, **51**(6), 277-282. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.07.166. ISSN 24058963. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405896318309121>

*(D5/Q3 130 /235 Control and Systems Engineering - údaje z roku 2018) - Scopus ScimagoJR, SJR: 0,298, Průměrný centil 56 %*

[MM6] KOZIOREK, J., KRAUT, R., GAVLAS, A., MIKOLAJEK, M., PAPCUN, P., ZOLOTOVA, I., Effective control system design with commissioning based on digital twin. (2018) 48th International Conference on Computers and Industrial Engineering, CIE 2018, Volume 2018-December, 2018, 15p, Code 144541

[MM7] KOZIOREK, J., GAVLAS, A., KONECNY, J., MIKOLAJEK, M., KRAUT, R., WALDER, P., Automated control system design with model-based commissioning. (2019) *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, North Atlantic University Union NAUN, Volume 13, 2019, Pages 6- 12, ISSN:1998-4464

*(D8/Q4 82/98 Signal Processing, D8/Q4 504/629 Electrical and Electronic Engineering – údaje z roku 2019) - Scopus ScimagoJR, SJR: 0,158, Průměrný centil 82 %*

**Vědeckovýzkumné výstupy z evidence VŠB-TUO:**


2019	Zařízení na měření výšky hladiny a koncentrace kapalin	Hercík, Kučera, Koziorek, Prauzek, Macháček, Mikolajek.	PUV 2019-35923, 32756
2019	Implementace měřicího cyklu a komunikačních protokolů	Prauzek Michal Martinek Radek Radim Hercík Koziorek Jiří Mikolajek Martin Stankuš Martin	025/20-12-2019_SW
2017	Fyzikální model pro komplexní testování ultrasonického senzoru	Prauzek Michal Mikolajek Martin Hercík Radim Koziorek Jiří	028/05-12-2017_F
2014	Měření teplot ve vrtech za pomoci bezdrátových měřících jednotek	Koziorek Jiří Vavrla Tomáš Prauzek Michal Mikolajek Martin	005/19-12-2014_PO

## Informace o autorovi dle databází

	Počet záznamů	Počet všech citací	Počet citací bez auto citací	H index
Web of Science	5	15	15	2
Scopus	7	18	18	2

### Mikolajek, Martin

[VSB – Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic](#) [Show all author info](#)

 56167503200 [Connect to ORCID](#)  [Is this you? Connect to Mendeley account](#)

[Edit profile](#) [Set alert](#) [Potential author matches](#) [Export to SciVal](#)

#### Document & citation trends



[Analyze author output](#) [Citation overview](#)

#### Most contributed Topics 2015–2019

Automated Production; Programmable Logic Controllers; Control Software

[1 document](#)

Electrocardiograph; University Management; Electronic Countermeasures

[1 document](#)

Commissioning; Virtual Manufacturing; Automated Production

[1 document](#)

[View all Topics](#)

#### Metrics overview

7

Documents by author

18

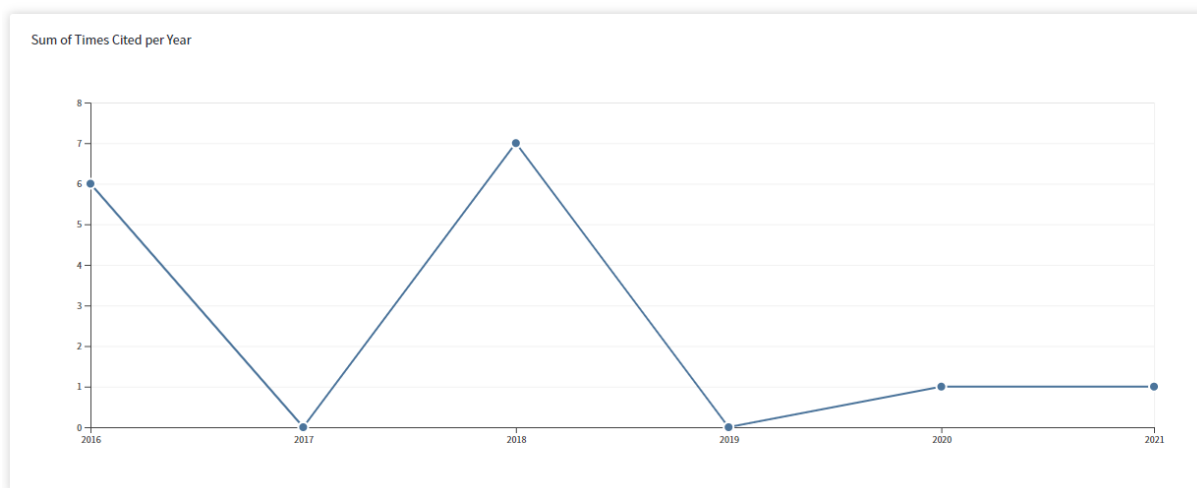
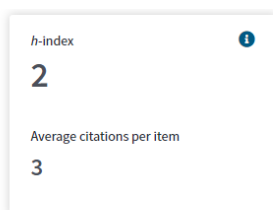
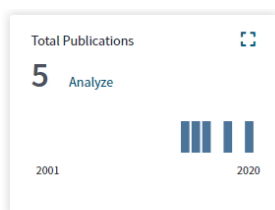
Citations by **18 documents**

2

*h-index:* [View h-graph](#)

#### Graf citací dle databáze Scopus





Graf citací dle databáze Web of Science

## Seznam řešených projektů

1. OP PIK Aplikace CZ.01.1.02/0.0/0.0/19\_262/0020003. Modulární kamerový TQC Tester s prvky umělé inteligence (člen řešitelského týmu, 2020–2022)
2. OP PIK Aplikace CZ.01.1.02/0.0/0.0/17\_147/0020565. Automatizovaný návrh řídicích systémů metodami průmyslu 4.0 s podporou virtuálních technologií. (člen řešitelského týmu, 2020–2022)
3. OP VVV CZ.02.1.01/0.0/0.0/17\_049/0008425. Platforma pro výzkum orientovaný na Průmysl 4.0 a robotiku v ostravské aglomeraci. (vedoucí výzkumného záměru, člen řešitelského týmu, 2018–2022)
4. CORNET (COLlective REsearch NETworking), Efficoil – Resource-efficient, flexible manufacturing and testing processes for high performance coils. V ČR vedeno jako CZ.01.1.02/0.0/0.0/16\_079/0008848. (spoluřešitel, partneři projektu – FVA, NEK, Fraunhofer Institut, 2019–2020)
5. TAČR TH04010428. Výzkum možností robotizace technologie kompletace kovových výrobků s pryží. (další řešitel, hlavní příjemce – Optimont, 2019–2021)
6. MPO TRIO, FV10422. Výzkum a vývoj optických a vláknově optických senzorů teploty pro automobilové aplikace. (další řešitel, Continental, 2016–2019)
7. OP PIK Aplikace, CZ.01.1.02/0.0/0.0/15\_019/0004919. Ultrasonické měření výšky hladiny a koncentrace urea kapaliny. (další řešitel, hlavní příjemce – Continental, 2017–2019)
8. Vývoj algoritmů a systémů pro řídicí, monitorovací a bezpečnostní aplikace VI, SP2020/42, 2020-2020
9. Vývoj algoritmů a systémů pro řídicí, monitorovací a bezpečnostní aplikace V, SP2019/107, 2019-2019
10. Vývoj algoritmů a systémů pro řídicí, monitorovací a bezpečnostní aplikace III, SP2017/158, 2017-2017
11. Vývoj algoritmů a systémů pro řídicí, monitorovací a bezpečnostní aplikace II, SP2016/162, 2016-2016
12. Vývoj algoritmů a systémů pro řídicí, monitorovací a bezpečnostní aplikace, SP2015/154, 2015-2015
13. Mikroprocesorové systémy pro řídicí a monitorovací aplikace, SP2014/156, 2014-2014
15. Sběr a zpracování dat z rozsáhlých distribuovaných systémů II, 2012-2012

# Životopis

## Osobní údaje:

**Martin Mikolajek**

martin.mikolajek@vsb.cz

## Pracovní zkušenosti:

2016 - současnost

### **Vědecký pracovník**

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Projekty v oblasti senzorové techniky pro automobilový průmysl

Výuka předmětů z oblasti průmyslové automatizace

2010 - 2015

### **Programátor PLC aplikací a simulací**

Ingeteam a.s., Ostrava – Poruba

Programátor simulací technologických procesů pro uvádění PLC aplikací.  
Virtuální uvádění PLC aplikací do provozu.

03/2015 – 06/2015

### **Pracovní stáž Grenoble Institute of Technology, Grenoble (Francie)**

Práce v PLC laboratoři, programátor PLC aplikací

## Vzdělání:

2013 – současnost

### **Doktorské studium**

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky, Obor technická kybernetika

2010 – 2013

### **Magisterské studium**

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

2007 – 2010

### **Bakalářské studium**

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

## Ostatní zkušenosti:

### **Jazykové znalosti**

Angličtina B2

### **Pracovní dovednosti**

Programování PLC systémů, vizualizačních systémů, simulačních systémů  
Znalost jazyka C, C#, znalost elektroniky,

Ostatní kvalifikace:

Průkaz zkušebního pilota ultralehkých letadel.

Omezený průkaz radiotelefonisty letecké pohyblivé služby.

Elektro kvalifikace podle § 14 vyhlášky č.50/1978 Sb. o odborné způsobilosti v elektrotechnice §6,7,8,10.

Osvědčení montáže a opravy vyhrazených plynových zařízení.

Řidičské oprávnění: A, B

Ostatní zkušenosti:

Stavba a provoz rádiově řízených modelů letadel.